

**UNIVERSIDAD MILITAR**

**NUEVA GRANADA**



**ADAPTACIÓN DE PINZAS DE LAPAROSCOPIA A DISPOSITIVOS  
HAPTICOS PHANTOM OMNI Y DESARROLLO DE SOFTWARE DE  
EVALUACIÓN**

**AMANDA PAULIN ALDANA SUÁREZ**

**SUSANA DEL PILAR YAÑEZ MANTILLA**

Trabajo de Grado para optar al Título de Ingeniero en Mecatrónica

**DIRECTOR**

Ingeniero Byron Alfonso Pérez Gutiérrez M.Sc,

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**BOGOTA D.C.**

**2013**

ADAPTACIÓN DE PINZAS DE LAPAROSCOPIA A DISPOSITIVOS HAPTICOS  
PHANTOM OMNI Y DESARROLLO DE SOFTWARE DE EVALUACIÓN

AMANDA PAULIN ALDANA SUÁREZ

SUSANA DEL PILAR YAÑEZ MANTILLA

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BOGOTA D.C.

2013

ADAPTACIÓN DE PINZAS DE LAPAROSCOPIA A DISPOSITIVOS HAPTICOS  
PHANTOM OMNI Y DESARROLLO DE SOFTWARE DE EVALUACIÓN

AMANDA PAULIN ALDANA SUÁREZ

SUSANA DEL PILAR YAÑEZ MANTILLA

Trabajo de Grado para optar al Título de Ingeniero en Mecatrónica

DIRECTOR

Ing. Byron Alfonso Pérez Gutiérrez M.Sc,

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BOGOTA D.C.

2013

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá, Junio de 2013

## **DEDICATORIA**

A Dios, por estar conmigo siempre y darme fortaleza. A mis padres, Álvaro Yáñez y Gladys Mantilla por su incondicional apoyo en todos los momentos difíciles, su amor permanente y por sus grandes consejos tanto en el ámbito personal como académico, en el cual me sorprendían gratamente por sus conocimientos de ingeniería. A mi hermano, tías, abuelas, familiares y amigos por su dedicación y compañía.

Susana del Pilar Yáñez Mantilla

A Dios, por ser mi guía en cada paso que doy. A mis padres Mario Aldana y Bertha Suárez por sus consejos, valores y enseñanzas, que día a día me han ayudado a crecer tanto académicamente como personalmente. A mis abuelas y demás familiares que con su apoyo y constante entrega han hecho posible que sea la persona que soy.

Amanda Paulin Aldana Suarez

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseamos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestro director, el ingeniero Byron Pérez Gutiérrez por su apoyo, colaboración, orientación y soporte a lo largo del desarrollo del presente trabajo de grado.

A la Universidad Militar Nueva granada por la formación académica y personal brindada a lo largo de nuestro proceso de aprendizaje, igualmente por el suministro de materiales y equipos empleados para el desarrollo de este trabajo de grado.

Finalmente, a todas aquellas personas que nos brindaron su apoyo y tiempo durante la planeación y ejecución del presente trabajo de grado.

# CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	20
1. NÚCLEO TEMÁTICO .....	22
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	22
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	22
1.2.1. OBJETIVOS .....	23
1.2.2. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO .....	24
1.2.3. METODOLOGÍA .....	25
2. MARCO TEÓRICO .....	26
2.1. ESTADO DEL ARTE .....	26
2.2. MARCO CONCEPTUAL .....	29
2.2.1. Realidad Virtual .....	29
2.2.2. Háptica .....	29
2.2.3. Sistema Háptico Sensable Phantom Omni .....	32
2.2.4. Entrenamiento Basado en Simulación .....	33
2.2.5. Laparoscopia .....	36

2.2.6.	H3DAPI .....	40
3.	INGENIERÍA DEL PROYECTO.....	49
3.1.	ANÁLISIS DEL PROBLEMA.....	49
3.1.1.	Requerimientos del Sistema .....	49
3.1.2.	Modelo Estructural del Sistema.....	50
3.2.	DISEÑO .....	61
3.2.1.	DISEÑO CONCEPTUAL .....	61
3.2.2.	DISEÑO DETALLADO .....	63
4.	DESARROLLO.....	80
4.1.	SISTEMA ELECTRÓNICO/MECÁNICO .....	80
4.2.	EVALUACIÓN DEL SISTEMA .....	84
4.2.1.	Análisis de Varianza ANOVA .....	87
4.2.2.	Prueba t de Student .....	91
4.2.3.	Encuesta Post-Pruebas.....	95
5.	CONCLUSIONES.....	97
6.	TRABAJOS FUTUROS .....	99
7.	BIBLIOGRAFÍA .....	100
	ANEXOS.....	104



PRE REQUISITOS .....	112
PINZAS LAPAROSCOPICAS .....	112
CALIBRACIÓN DISPOSITIVOS HÁPTICOS .....	112
ABRIR UN ARCHIVO X3D .....	114
APLICACIONES DESARROLLADAS .....	116
Ubicación Píldoras.....	116
Limpieza Vena.....	117
Navegación y Recolección .....	118

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Promedio de Datos de las Pruebas .....	85
Tabla 2. Resumen del Análisis ANOVA "Ubicación Píldoras" .....	88
Tabla 3. Indicadores ANOVA "Ubicación Píldoras" .....	88
Tabla 4. Resumen del Análisis ANOVA "Limpieza Vena" .....	89
Tabla 5. Indicadores ANOVA "Limpieza Vena" .....	90
Tabla 6. Resumen del Análisis ANOVA "Navegación y Exploración" .....	90
Tabla 7. Indicadores ANOVA "Navegación y Exploración" .....	90
Tabla 8. Valores F de las aplicaciones .....	91
Tabla 9. Resultados Antes y Después Aplicaciones .....	91
Tabla 10. Prueba t "Ubicación Píldoras" .....	92
Tabla 11. Prueba t "Limpieza Vena" .....	93
Tabla 12. Prueba t "Navegación y Exploración" .....	94

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema del Sistema Propuesto.....	24
Figura 2. Dispositivo Háptico Phantom Omni .....	33
Figura 3. Imagen Procedimiento Laparoscópico.....	37
Figura 4. Electrobisturi Valleylab Ligasure .....	38
Figura 5. Instrumento Unipolar de Cauterización Endo Dissect 5 mm.....	40
Figura 6. H3DAPI.....	41
Figura 7. Arquitectura H3DAPI.....	42
Figura 8. Código para crear una caja con Fricción en la Superficie.....	45
Figura 9. Ejemplo de Caja con Fricción en la Superficie.....	45
Figura 10. Arquitectura Interfaz.....	50
Figura 11. Arquitectura Estructura Mecánica/Electrónica .....	51
Figura 12. Esquema Físico del Sistema .....	51
Figura 13. Esquema Interfaz Háptica.....	53
Figura 14. Sistema háptico Sensable Phantom Omni, Sistema Estructural.....	53

Figura 15. Sistemas de coordenadas CSO, CS1, CS2 y CS3 definidos en el estudio del Dispositivo Phantom Omni .....	55
Figura 16. Relaciones geométricas entre EE y el CSO .....	57
Figura 17. Figura del Teorema del Coseno .....	58
Figura 18. Unidades entrenadoras Facultad de Medicina UMNG.....	62
Figura 19. Conector Estéreo Phantom Omni .....	64
Figura 20. Stylus Phantom Omni .....	64
Figura 21. Esquema Electrónico .....	64
Figura 22. Esquema Electrónico Detallado.....	65
Figura 23. Modelo CAD de Pinza Endo Dissect.....	65
Figura 24. Modelo CAD Endo Dissect (Conector Estéreo Hembra).....	66
Figura 25. Modelo CAD Endo Dissect (Ubicación Pulsador) .....	66
Figura 26. Modelo CAD de Electrobisturi Valleylab Ligasure.....	67
Figura 27. Modelo CAD Electrobisturi Valleylab Ligasure (Conector Estéreo Hembra).....	67
Figura 28. Modelo CAD Electrobisturi Valleylab Ligasure (Ubicación Pulsadores).....	67
Figura 29. Modelo CAD Caja Contenedora .....	68
Figura 30. Modelo CAD Tapa Superior.....	68

Figura 31. Modelo CAD Caja Total .....	69
Figura 32. Modelo CAD Caja Total con las Pinzas Adaptadas .....	69
Figura 33. Aplicación Colisiones Phantom Omni .....	70
Figura 34. Aplicación Botones Phantom Omni .....	71
Figura 35. Aplicación “Ubicación Píldoras” Software. ....	72
Figura 36. Esquema del Programa “Ubicación Píldoras”. ....	73
Figura 37. Aplicación “Limpieza Venas” Software.....	74
Figura 38. Esquema del Programa “Limpieza Venas”. ....	75
Figura 39. Aplicación “Navegación y Recolección” Software.....	76
Figura 40. Esquema del Programa “Navegación y Recolección”.....	76
Figura 41. Estructura de Evaluación del Sistema .....	77
Figura 42. Componentes Pinza Endo Dissect .....	80
Figura 43. Ubicación del Pulsador en la pinza .....	81
Figura 44. Instalación del cableado .....	81
Figura 45. Pinza Endo Dissect adaptada a Phantom Omni .....	81
Figura 46. Componentes Pinza Electrobisturi Ligasure .....	82
Figura 47. Ubicación del Pulsador Interno en la pinza y cableado.....	82
Figura 48. Ubicación del Pulsador Externo en la pinza.....	82

Figura 49. Pinza Electrobisturi Ligasure adaptada a Phantom Omni.....	82
Figura 50. Tapa Caja Contenedora (Maniquí).....	83
Figura 51. Caja contenedora Completa .....	84
Figura 52. Evaluación Juego "Ubicación Píldoras" .....	86
Figura 53. Evaluación Juego "Limpieza Vena" .....	86
Figura 54. Evaluación Juego "Navegación y Exploración" .....	87
Figura 55. Imágenes de Evaluación del Sistema .....	94
Figura 56. Gráfico Resultados Encuesta .....	96

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Planos Caja .....	104
Anexo 2. Diagramas de Clases y Dependencia Aplicaciones.....	107
Anexo 3. Manual de Uso.....	110
Anexo 4. Tablas de Datos para la Evaluación del Sistema.....	121

## **GLOSARIO**

**HÁPTICA** capacidad de interactuar con un entorno, por medio del sentido del tacto, con una serie de receptores que envían información de la textura, forma, tamaño, relieve.

**HARDWARE** conjunto de los componentes que integran la parte material de un sistema.

**INMERSION** acción de introducir o introducirse plenamente alguien en un ambiente determinado.

**INSTRUMENTAL** conjunto de instrumentos profesionales del médico o del cirujano.

**LAPAROSCOPIA** exploración visual de la cavidad abdominal con el laparoscopio.

**REALIDAD VIRTUAL** representación de escenas o imágenes de objetos producida por un sistema informático, que da la sensación de su existencia real.

**RENDERIZADO** término usado en jerga informática para referirse al proceso de generar una imagen o vídeo mediante el cálculo de iluminación GI partiendo de un modelo en 3D. Este término técnico es utilizado por los animadores o productores audiovisuales (CG) y en programas de diseño en 3D como por ejemplo 3DMax, Maya, Blender, etc.

**SIMULADOR** aparato que reproduce el comportamiento de un sistema en determinadas condiciones, aplicado generalmente para el entrenamiento de quienes deben manejar dicho sistema.



**SOFTWARE** conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en un sistema.

## **RESUMEN**

El presente trabajo de grado tiene como objetivo el desarrollo y evaluación de un simulador de entrenamiento, para el uso de instrumental quirúrgico laparoscópico; mediante la implementación de un sistema que integra dispositivos hápticos y un prototipo de software de evaluación. El proyecto se puede dividir en tres grandes partes: La primera es la integración de las pinzas laparoscópicas al dispositivo háptico Phantom Omni, la segunda es el desarrollo del prototipo de software de interacción con el sistema mecánico, y la tercera se refiere a las pruebas de funcionamiento y evaluación del sistema final.

**PALABRAS CLAVE:** Simulador, Instrumental Laparoscópico, Dispositivo Háptico, Prototipo de Software, Phantom Omni.

## **ABSTRACT**

The present work aims to develop and evaluate a training simulator using laparoscopic surgical instruments, by implementing a system that integrates haptic devices and prototype evaluation software. The project can be divided into three main parts: The first is the integration of laparoscopic forceps to Phantom Omni haptic device, the second is the development of the interaction prototype software con the mechanical system, and the third, refers to tests operation and evaluation of the final system.

**KEYWORDS:** Haptic Device, Instruments, Laparoscopic, Simulator Software Prototype, Phantom Omni.

## INTRODUCCIÓN

Los procedimientos quirúrgicos laparoscópicos son técnicas especializadas, comúnmente utilizadas en cirugías ginecológicas, urológicas y del aparato digestivo, entre otras.

Estas cirugías, se catalogan como procedimientos mínimamente invasivos. Se trata métodos en los que se evita abrir las cavidades del organismo en favor de una cirugía cerrada y local. El experto introduce un Endoscopio en la cavidad que se va a estudiar (en el tórax, en el abdomen, en la articulación...etc.) obteniendo una imagen de las estructuras en un monitor. Gracias a esta visión, y con manipulación externa de otros instrumentos, se puede realizar la exploración de los órganos que contiene la cavidad y operar sobre ellos. [1]

Una dificultad para realizar este tipo de cirugía es obtener habilidades y destrezas en el uso del instrumental relacionado, teniendo en cuenta las limitaciones a nivel ético que existen en las prácticas con personas, animales y/o cadáveres, donde estos últimos por su misma condición tienen propiedades diferentes a las de los tejidos vivos. Como solución para esta dificultad, se plantea el uso de simuladores computacionales que permitan integrar modelos virtuales de la anatomía de un paciente y un modelo de interacción con el usuario.

Este trabajo se enfoca la interacción entre el usuario y modelos virtuales, utilizando instrumental quirúrgico real (pinzas de laparoscopia), integrado a los dispositivos hápticos Phantom Omni de la empresa Sensable, existentes en el Centro de Realidad Virtual de la Universidad Militar Nueva Granada. Esta integración se somete a protocolo experimental, en el cual se evalúa la efectividad del sistema.

El dispositivo plantea una alternativa de solución al reconocimiento y uso del instrumental laparoscópico, logrando que el individuo a interactuar con las pinzas, desarrolle práctica antes de realizar procedimientos sobre pacientes reales.

# **1. NÚCLEO TEMÁTICO**

En este capítulo se describen las características preliminares al desarrollo del proyecto, como el planteamiento del problema, justificación, objetivos, delimitación del proyecto y metodología.

## **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

¿Es posible mejorar las habilidades de manipulación de pinzas de laparoscopia; integrándolas a dispositivos hápticos, mediante un software de implementación?

En este proyecto, se desarrolló una alternativa de simulador entrenador en el manejo de instrumental laparoscópico, utilizando conocimientos de Realidad Virtual e integrándolos a un prototipo mecánico.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

El desarrollo de simuladores para el entrenamiento médico es de gran importancia, debido a que estos crean condiciones en las cuales cometer errores no es perjudicial o peligroso para los pacientes; minimizan riesgos como lesiones quirúrgicas, cirugías en partes no afectadas u órganos sanos y muertes en el quirófano debido a fallas en los procedimientos. Este tipo de herramientas son de gran utilidad, en el proceso de formación de profesionales en la medicina, ya que por medio de estos el usuario se familiariza con el instrumental característico de diferentes tipos de procedimientos y desarrolla sus habilidades y destrezas en el uso del mismo.

En este trabajo, se integran un sistema electrónico y mecánico (en el cual se adaptan instrumentales laparoscópicos a dispositivos hápticos), con un prototipo de software de implementación. Esta aplicación consiste en desarrollar la base para un futuro simulador de Cirugía Laparoscópica, herramienta necesaria para entrenar a profesionales de la salud en el uso de los instrumentales para procedimientos quirúrgicos.

Analizando el impacto económico, este simulador; se convierte en una alternativa más accesible, en una relación de precios 3:1, con respecto a otros simuladores más complejos, ya existentes en el mercado; como los propuestos por las empresas Simbionix (Arthro Mentor, simulador de entrenamiento artroscópico) [2] e Immersion (Laerdal Virtual I.V. Simulator, simulador de sistema para cateterización) [3].

### 1.2.1. OBJETIVOS

#### 1.2.1.1 Objetivo General

Integrar dos pinzas de laparoscopia a dos dispositivos hápticos Sensable Phantom Omni, para manipulación de objetos dentro un entorno virtual.

#### 1.2.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar las modificaciones mecánicas necesarias a los instrumentales laparoscópicos para adaptarlos a los dispositivos hápticos Phantom Omni, integrando los botones de acción y todos sus grados de libertad.
- Desarrollar un entorno virtual donde el usuario pueda manipular objetos utilizando las pinzas y verificar su funcionamiento.

- Desarrollar un protocolo experimental para evaluar el desempeño del simulador.

### 1.2.2. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO

Este proyecto incluye un sistema mecánico con el fin de adaptar los instrumentos quirúrgicos a los dispositivos hápticos Sensable Phantom Omni. Cuenta con un software donde se evalúa el uso e interacción con el instrumental adaptado mediante un ambiente virtual en el que el usuario podrá realizar diferentes tareas donde el uso combinado de hardware y software permitirá desarrollar habilidades en la manipulación de las pinzas de laparoscopia. El simulador se desarrolló, implementó y evaluó en el Laboratorio de Realidad Virtual de la Universidad Militar Nueva Granada; dentro de un periodo de siete meses, desde la fecha de aprobación de la propuesta.

En la Figura 1 se presenta un diagrama esquemático del sistema desarrollado.

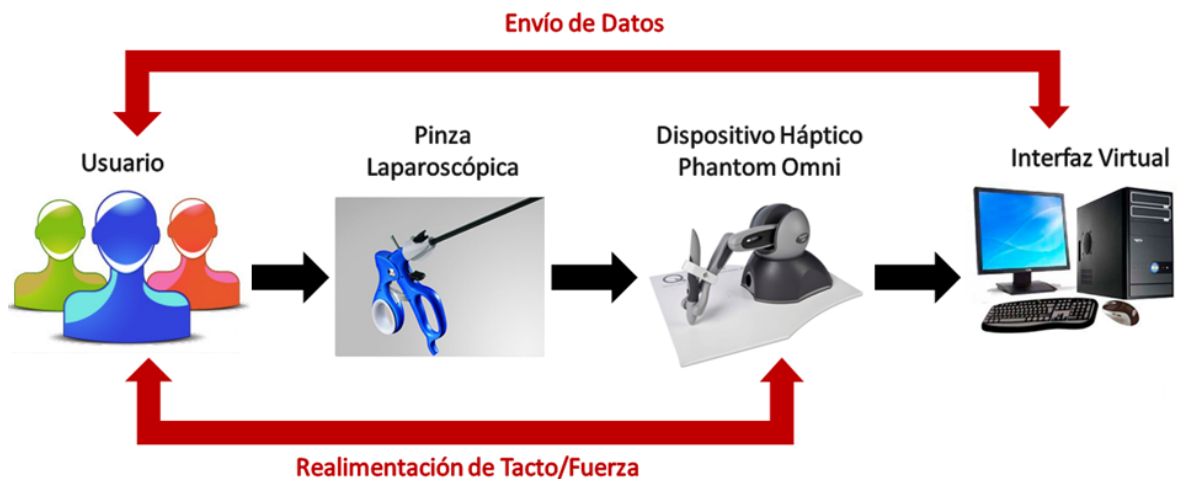


Figura 1. Esquema del Sistema Propuesto



### 1.2.3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para el desarrollo del trabajo de grado está estructurada de la siguiente manera:

- Revisión del estado del arte en simuladores y aplicaciones que integran instrumentales y sistemas hápticos.
- Selección los instrumentales a adaptar al sistema háptico: Pinzas Laparoscopia.
- Realización del diseño detallado de todas las piezas y el conjunto mecánico a implementar.
- Construcción las piezas necesarias para el ensamblaje de las pinzas.
- Ensamblaje las pinzas e integración al sistema háptico.
- Desarrollo de un prototipo de software, donde interactuará el sistema integrado.
- Desarrollo del protocolo experimental.
- Aplicación de pruebas de funcionamiento del simulador.
- Análisis estadístico y evaluación de resultados.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. ESTADO DEL ARTE**

Para poder desarrollar el proyecto descrito en este documento, fue necesario investigar sobre el software y hardware implicado en el mismo, explorando el desarrollo previo, de sistemas y aplicaciones que involucraran y relacionaran elementos referentes a realidad virtual, plataformas y librerías de desarrollo, dispositivos hápticos, simuladores de laparoscopia y otros procedimientos quirúrgicos.

En cuanto plataformas y librerías, en el año 2012 se presenta multiplataforma H3DAPI para desarrollo háptico en C++, visualización y simulación interactiva en tiempo real. H3DAPI es compatible con diferentes dispositivos hápticos disponibles en el mercado; de tres, seis y siete grados de libertad. [4]

En el año 2006, durante la Conferencia Internacional Anual EMBS, Ryan McColl presentó un trabajo acerca del renderizado háptico y estudios de percepción para la simulación de cirugía laparoscópica; donde estudiaba la aplicación de realimentación háptica a simuladores laparoscópicos de realidad virtual [5]. De esta manera, se estudió la relación de las aplicaciones de realidad virtual, (utilizando dispositivos hápticos) y los simuladores de cirugía. Además, en la Conferencia internacional de Control, Automatización y Sistemas, desarrollada en el año 2011, en Gyeonggi Korea, se presentó el análisis cinemático y Jacobiano de una interfaz háptica estructurada paralelamente para la simulación laparoscópica [6], complementando así el estudio de interfaces hápticas en simuladores médicos.

A parte de estos estudios, en el año 2011, durante Conferencia Internacional de la Solución de Problemas Computacionales, se presentó un artículo sobre los sistemas de simulación de histeroscopia laparoscópica. Esta investigación estudiaba los algoritmos de procesamiento, detección de colisiones, cálculo de deformaciones, planificación de trayectorias en sistemas de simulación virtual [7], características que permitieron el desarrollo de las aplicaciones incluidas en este trabajo.

Los simuladores médicos existentes en el mercado, comprenden procedimientos diversos como cateterismo intravenoso, cirugía artroscopica y laparoscópica, entre otros. Algunos de ellos son el simulador Virtual I.V., desarrollado por la empresa Laerdal en el año 2010; el cual ofrece un completo y totalmente interactivo sistema de aprendizaje para la formación en cateterismo intravenoso con potentes gráficos en 3D, que proporcionan un realismo visual, mientras que un dispositivo háptico simula con precisión el sentido del tacto para una experiencia verdaderamente inmersiva [8]. Otro sistema de simulación médica comercial, es el construido por la empresa Symbionix: ARTHRO Mentor, enfocado a la práctica de aspectos clave de la cirugía artroscópica en un entorno de realidad virtual. El simulador cuenta con una línea de procedimientos simulados, que combina fibra de vidrio modelos anatómicos (hombro y rodilla) con imágenes en 3D y la sensación táctil utilizando dos Sensable Phantom Omni, para permitir a los usuarios aprender aspectos clave de los procedimientos [9].

Se encontraron diversos simuladores y entrenadores quirúrgicos desarrollados por instituciones educativas, como el implementado por el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Salford en Londres en el año 2005; este presentaba un sistema de entrenamiento pre operativo de cirugía abierta para el remplazo total de cadera, basado en el uso y acoplamiento de dos dispositivos

hápticos de tres grados de libertad cada uno, obteniendo un solo dispositivo háptico de seis grados de libertad más fácil de usar y realista para el usuario al compararlo con los otros sistemas [10] o el VBLasST, entrenador virtual básico de destreza en laparoscópica, construido por el departamento de Ingeniería Mecánica, Aeroespacial e Ingeniería Nuclear del Rensselaer Polytechnic Institute, Troy / NY, en el año 2008, mediante el cual se pueden realizar las tareas disponibles en el sistema FLS (Fundamentals of Laparoscopic Surgery) utilizando un computador, con ayuda de dos Sensable Phantom Omni los cuales simulan los dos instrumentales utilizados [11].

Además de los proyectos del departamento de Mecatrónica de la Universidad Politécnica Timisoara de Rumania, en el año 2010, donde desarrolló una un sistema pre operativo para la reconstrucción de la rodilla humana. El entorno es controlado por un sistema háptico Sensable Phantom Omni el cual sitúa, orienta y calcula la superficie virtual de la tibia donde la reconstrucción del ligamento cruzado anterior ACL se ubicará [12] y el sistema de simulación de laparoscopia con elementos hápticos, desarrollado en el año 2011 por la Facultad de Tecnología y Ciencias de la Información, del Instituto de Informática Visual de la Universidad Kebangsaan en Malasia, enfocado en la formación de los estudiantes de medicina del departamento de cirugía en HUKM (Hospital Universidad Kebangsaan Malasia [13].

Finalizando la investigación, se encontró el proyecto realizado por la Universidad Militar Nueva Granada en el Centro de Realidad Virtual: un simulador de cirugía Endoscópica Endonasal, con el fin de entrenar a cirujanos, visualizado en un entorno virtual. [14]

## 2.2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.2.1. Realidad Virtual

El término realidad virtual refiere a una interfaz de alta gama usuario-ordenador, que implica simulación en tiempo real e interactúa a través de múltiples canales sensoriales. Estas modalidades sensoriales son visuales, auditivas, táctiles, el olfato y el gusto.

La simulación que hace la realidad virtual se puede referir a escenas virtuales, creando un mundo virtual de lugares u objetos que existen en la realidad. También permite capturar la voluntad implícita del usuario en sus movimientos naturales proyectándolos en el mundo virtual que estamos generando, trazando en el mundo virtual movimientos reales.

Además, permite la inmersión completa en un mundo virtual, desconectando los sentidos completamente de la realidad teniendo la sensación la persona que está dentro de que la realidad corresponde en el mundo virtual.

Las aplicaciones que en la actualidad encontramos de la realidad virtual a actividades de la vida cotidiana son muchas y diversas. Hay que destacar: la reconstrucción de la herencia cultural, la medicina, la simulación de multitudes y la sensación de presencia. [15]

### 2.2.2. Háptica

La tecnología háptica proviene del griego *háptō* (tocar, relativo al tacto) y se define como la capacidad de interactuar con un medio por medio del sentido del tacto con

una serie de receptores que nos dan información de la textura, forma, tamaño, relieve, etc. [16]

#### 2.2.2.1 Impedancia y Admitancia

Hay dos caminos principales por los cuales un dispositivo háptico puede ser controlado, los paradigmas de control de impedancia y admitancia. [17]

Impedancia: el usuario mueve el dispositivo, y el dispositivo reaccionará con una fuerza si es necesario en función del desplazamiento. Esta es la interacción básica entre el usuario y el bucle de control. El paradigma es: " el desplazamiento entra - la fuerza sale".

Admitancia: el dispositivo mide las fuerzas que el usuario ejerce sobre él, y reacciona con el movimiento (la aceleración, la velocidad, la posición). El paradigma es: "fuerza entra - desplazamiento sale".

En los sistemas actuales el caso que encontramos con más frecuencia es el de control por impedancia, el flujo de control incluirá los siguientes eventos:

- Los sensores de desplazamiento recogen el movimiento.
- Envío mediante controlador hardware de este desplazamiento al simulador software.
- El simulador identifica si hay colisión o no y de que magnitud.
- El controlador hardware ordena al motor mantener una determinada posición.
- El motor hace la fuerza necesaria para ello.

#### 2.2.2.2 Dispositivos e Interfaces hápticas

La gran parte de simulaciones desarrolladas en entornos virtuales involucraban exclusivamente la vista y el oído; debido a la necesidad de simulaciones y entornos más realistas se ha acudido a la implementación de dispositivos e interfaces graficas que permiten al usuario tocar, sentir y manipular los objetos simulados en el entorno virtual. [18]

Algunos de los principales campos de aplicación de los interfaces hápticos son:

- Medicina: Simuladores quirúrgicos para entrenamiento médico, micro robots para cirugía mínimamente invasivas, etc.
- Educacional: Proporcionando a los estudiantes la posibilidad de experimentar fenómenos a escalas nano y macro, escalas astronómicas, como entrenamiento para técnicos, etc.
- Entretenimiento: Juegos de video y simuladores que permiten al usuario sentir y manipular objetos virtuales, etc.
- Industria: Integración de interfaces hápticos en los sistemas CAD de tal forma que el usuario puede manipular libremente los componentes de un conjunto en un entorno inmersivo.
- Artes gráficas: Exhibiciones virtuales de arte, museos, escultura virtual etc.

Las interfaces hápticas pueden clasificarse en tres grandes grupos, según proporcionen: realimentación de fuerza, realimentación táctil, o realimentación propia receptiva.

Los interfaces que proporcionan realimentación de fuerza aportan datos relacionados con la dureza, peso e inercia del objeto virtual. Los interfaces que proporcionan una realimentación de fuerza táctil nos permiten adquirir datos tales

como la geometría del objeto virtual, su rugosidad y temperatura, entre otros. Por último, los interfaces que proporcionan realimentación de fuerza propia receptiva nos dan información acerca de la posición del cuerpo del usuario o su postura.

En este trabajo se utilizaron interfaces hápticas de realimentación de y realimentación de fuerza táctil de los cuales podemos encontrar en el mercado:

- Dispositivos de Escritorio, que permiten la interacción puntual con el objeto virtual a través de un terminal, materializado como un lápiz, dedo virtual o un joystick, además de que permiten al usuario sentir o percibir la dureza de una superficie, su rugosidad, seguir contornos lisos, o materiales elásticos en 2 dimensiones.
- Guantes, que permiten la manipulación “dexterizada” (en múltiples puntos de contacto) de objetos virtuales con retorno de fuerza.

Para la selección del mejor dispositivo háptico se debe tener en cuenta los grados de libertad del dispositivo que requiera el simulador, el espacio de trabajo, el rango de control de fuerza que se quiere manejar entre otros requerimientos más específicos.

### 2.2.3. Sistema Háptico Sensable Phantom Omni

Uno de los sistemas hápticos mas usados a nivel mundial en aplicaciones de realidad virtual es el Phantom Omni desarrollado por la empresa Sensable ilustrado en la Figura 2.





Figura 2. Dispositivo Háptico Phantom Omni

Actualmente se dispone de varios modelos de este interface, cuyo número de grados de libertad en posicionamiento varía desde 3 hasta 6, pudiendo recibir realimentación de fuerza a lo largo de todos o algunos de estos grados de libertad. El espacio de trabajo de los distintos modelos varía considerablemente desde los modelos iniciales a los superiores. La fuerza máxima que puede proporcionar es de 22N en el modelo Premium 3.0 y la fuerza sostenida (24h.) es de 3N. Conforme se avanza hacia modelos superiores, aumenta la inercia de los dispositivos, al tiempo que disminuye su rigidez. El Phantom renueva el estado de sus fuerzas cada milisegundo, y presenta una alta resolución posicional. [19]

#### 2.2.4. Entrenamiento Basado en Simulación

Tradicionalmente el entrenamiento en cirugía se ha llevado a cabo por el método maestro-aprendiz, de tal manera que los residentes acompañan a los especialistas en el desarrollo de sus intervenciones. Sin embargo la participación de los cirujanos en formación es limitada debido a que para los administradores hospitalarios los residentes pueden intervenir siempre y cuando la cirugía se

realice de manera segura, eficiente y sin complicaciones. En este orden de ideas, los pacientes se convierten en herramientas de aprendizaje y se corre el riesgo de cometer errores en la mesa de operaciones, que económicamente serían insostenibles para los responsables y no justificables dentro de un proceso de formación. [20]

Los errores médicos se pueden definir como aquellos incidentes en los cuales una acción planeada, que apunta a brindar bienestar al paciente, falla en su objetivo. Entre los errores en cirugía más comunes, en términos generales, se incluyen lesiones quirúrgicas, cirugías en partes no afectadas u órganos sanos, identidad errada de los pacientes a intervenir y muertes en el quirófano debido a fallas en los procedimientos.

La prevención total de los errores, sin embargo, no es factible porque la medicina es conducida por seres humanos. Pero se puede acudir a la educación médica basada en simulación para superar los problemas asociados a los errores procedimentales y entrenar con mayor constancia y énfasis a los futuros cirujanos.

La educación médica basada en simulación (SBME, por sus siglas en inglés), en su más amplio sentido puede ser definida como cualquier actividad educacional que utilice ayudas de simulación para replicar escenarios clínicos. Las herramientas de simulación sirven como una alternativa al paciente real y permiten que los educadores ganen un control total sobre un escenario clínico pre-seleccionado, sin tener que enfrentar los aspectos indeseados del aprendizaje en pacientes reales.

Al utilizar simuladores para entrenar a los médicos, se crean condiciones en las cuales cometer errores no es perjudicial o peligroso para los pacientes, lo cual

proporciona la oportunidad de practicar y recibir realimentación constructiva que permitirá evitar que se cometan errores al intervenir a pacientes reales.

En síntesis, el entrenamiento basado en simulación presenta las siguientes ventajas:

- Por medio de la simulación, se reduce el tiempo de aprendizaje de los estudiantes de cirugías tipo MIS, puesto que no es necesario esperar a que se presente un paciente que requiera intervención, para adquirir los conocimientos prácticos de la técnica.
- Por medio del uso de un simulador muchos médicos pueden aprender un procedimiento específico y de rara ocurrencia.
- Varios residentes pueden participar en operaciones y complicaciones específicas de los pacientes; adicionalmente pueden compartir y observar el manejo de eventos inesperados.
- Los médicos experimentados pueden ensayar procedimientos que no hayan realizado recientemente. Además pueden aprender nuevos procedimientos que han sido desarrollados desde que terminaron su residencia.
- Proporciona a los estudiantes y a los profesionales una oportunidad de aprender a través de sus propios errores y los errores de otros.
- Con la implementación de simuladores para el entrenamiento en la técnica de cirugía laparoscópica, se acudirá en menor porcentaje a los seres humanos y animales como herramientas de enseñanza. El aprendizaje se realizará en el simulador.

### 2.2.5. Laparoscopia

La laparoscopia (también laparoscopía) es una técnica que permite la visión de la cavidad pélvica-abdominal con la ayuda de una lente óptica. A través de una fibra óptica, por un lado se transmite la luz para iluminar la cavidad, mientras que se observan las imágenes del interior con una cámara conectada a la misma lente. [21]

En la Figura 3 se puede observar un procedimiento laparoscópico y los elementos que intervienen en el.

El mismo método permite intervenciones quirúrgicas, por lo que también se considera un sistema de cirugía de invasión mínima cuyo objetivo es curar o corregir enfermedades. El aparato utilizado se llama torre de laparoscopía y entra en el cuerpo a través de una pequeña incisión (habitualmente entre 0,5 y 1,5 centímetros).

Que el puerto de acceso sea pequeño no quiere decir el procedimiento que esté exento de riesgos, ya que se tiene acceso a órganos vitales que pueden ser dañados. Esta incisión se utiliza durante un corto período, al final del procedimiento, disminuyendo así el riesgo de infección de la herida, el dolor postoperatorio y las lesiones musculares de la pared abdominal. Esto hace que el postoperatorio sea menos doloroso, los pacientes requieran menos analgésicos y se movilicen antes. [22]

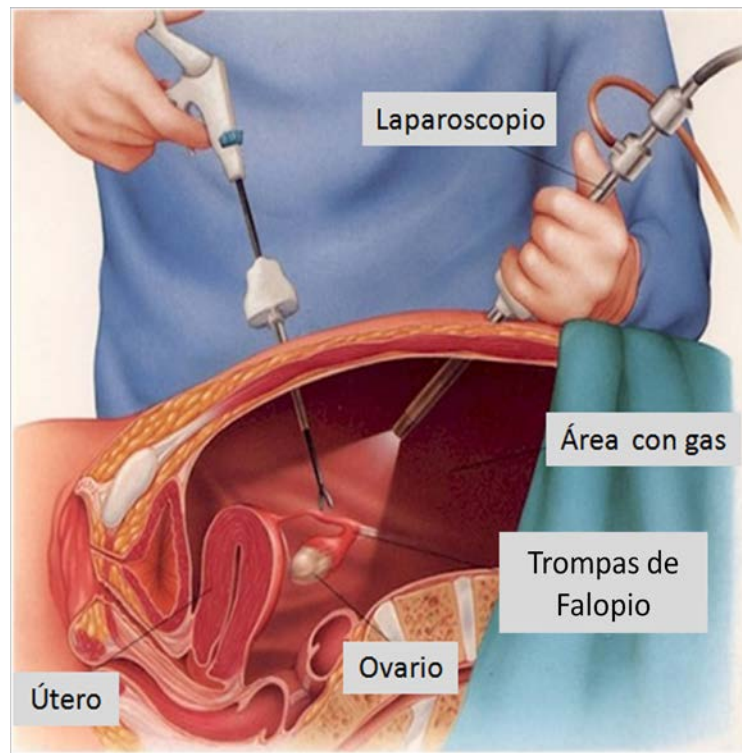


Figura 3. Imagen Procedimiento Laparoscópico

Fuente [21]

#### 2.2.5.1 Pinzas de Laparoscopia

##### 2.2.5.1.1 Electrobisturi Valleylab Ligasure

Desde su introducción al mercado en 1998, la tecnología de Ligasure ha establecido el estándar de la industria de sellado de vasos. La tecnología se ha utilizado en más de cuatro millones de procedimientos en todo el mundo, y está apoyado por un cuerpo creciente de investigación basada en la evidencia.

La eficacia clínica, la consistencia y la fiabilidad de los productos Ligasure se suministra a través de una variedad de instrumentos para su uso en

procedimientos tanto laparoscópicos y abiertos en una amplia gama de especialidades quirúrgicas, incluyendo ginecología, urología colorrectal y cirugía general.

En la Figura 4 se presenta un Electrobisturi Valleylab.



Figura 4. Electrobisturi Valleylab Ligasure

La eficacia clínica, la consistencia y la fiabilidad de los productos Ligasure se suministra a través de una variedad de instrumentos para su uso en procedimientos tanto laparoscópicos y abiertos en una amplia gama de especialidades quirúrgicas, incluyendo ginecología, urología colorrectal y cirugía general.

En toda la gama de productos y procedimientos, la tecnología Ligasure ofrece una combinación única de la precisión y la energía, para crear un sello de conformidad con cada aplicación.

- Proporciona una combinación de presión y la energía de fusión para crear vasos.
- Permanentemente fusiona los vasos hasta siete milímetros de diámetro y haces de tejido sin disección o el aislamiento.
- Medio ciclo de sellado es de 2 a 4 segundos.
- Sellos de soportar tres veces la presión arterial sistólica normal.
- Retroalimentación controlada por sistema de respuesta automática interrumpe el suministro de energía cuando el ciclo de sellado es completa, eliminando las conjeturas.
- Descripción de la pinza: tiene un dispositivo para presionar y que realice la coagulación y además un gatillo que permite cortar lo ya se ha sellado sin mover la pinza. [23]

#### 2.2.5.1.2 Instrumento Unipolar de Cauterización Endo Dissect 5 mm

El Endo Dissect 5 mm es un instrumento con cauterización unipolar que tiene aplicación en una variedad de procedimientos laparoscópicos, procedimientos generales de abdominales, urológicos, torácicos Endoscópicos para la movilización y la sección transversal del tejido (Figura 5).

El pomo de rotación situado en el mango hace girar el eje 360 grados. Las cuchillas de la tijera se cierran y se abren para seccionar tejido por la compresión y la liberación de los mangos de anilla.

El instrumento tiene un eje de cinco milímetros de diámetro con aislamiento, de aproximadamente 31 cm de longitud, y está diseñado para la introducción y uso en el paciente, a través un de mini puerto introductor. Las cuchillas de la tijera tiene

un filo de corte de aproximadamente 5,9 milímetros de longitud, con una abertura máxima de la hoja de 5,9 milímetros. [24]



Figura 5. Instrumento Unipolar de Cauterización Endo Dissect 5 mm

#### 2.2.6. H3DAPI

H3DAPI es una multiplataforma de código abierto, de escena gráfica APIx. H3D está escrito enteramente en C++ y utiliza OpenGL para la representación de gráficos y HAPI para el renderizado de hápticos. HAPI es una API háptica de código abierto desarrollado por el equipo detrás de API H3D. [25] En la Figura 6 se observa una aplicación desarrollada en esta plataforma.

H3D está construida usando diversos estándares industriales:



- X3D: El formato de archivo extensible sucesor al estándar VRML. Además de ser un formato, es una norma abierta ISO para el diseño de escenas gráficas. [26]
- XML: Extensible Markup Language, es un formato de idioma utilizado en una amplia variedad de aplicaciones. El formato X3D está basado en XML. [27]
- OpenGL: Open Graphics Library, es el multi-idioma multi-plataforma estándar para los gráficos 3D [28]
- STL: Es una gran colección de plantillas C++ que soportan el rápido desarrollo de aplicaciones de gran eficiencia.



Figura 6. H3DAPI

A diferencia de la mayoría de los diferentes escenarios gráficos API, H3DAPI está diseñado principalmente para apoyar un proceso especial de rápido desarrollo. Mediante la combinación de X3D, C++ y el lenguaje de programación Python, H3DAPI ofrece tres modos de programación de aplicaciones que ofrecen

velocidad de ejecución donde el rendimiento es fundamental, y la velocidad de desarrollo donde el rendimiento es menos crítico.

H3DAPI está escrito en C++, y está diseñado para ser extensible, lo que garantiza que los desarrolladores tengan la libertad y los medios para personalizar y añadir cualquier dispositivo háptico o elemento gráfico en H3DAPI para sus aplicaciones.

H3DAPI ha sido utilizado para desarrollar una amplia gama de aplicaciones multimodales en varios campos, incluyendo desarrollos en la visualización dentales, médicos, industriales y. Para fomentar el aprendizaje y el crecimiento en el uso de la tecnología háptica, H3DAPI es de código abierto y liberado bajo la licencia GNU GPL, con opciones para la concesión de licencias comerciales.

#### 2.2.6.1 Arquitectura H3DAPI

Esencialmente H3DAPI es una capa que encapsula gráficos y hápticos en una plataforma e implementa X3D y Python como una interfaz para el desarrollo de aplicaciones.



Figura 7. Arquitectura H3DAPI

Fuente [29]

Una de las características importantes de H3D API es que proporciona flexibilidad al programador más allá de X3D y Python scripting. H3D API está diseñado para ser modular y fácilmente extensible, los desarrolladores más avanzados pueden implementar gráficos de más bajo nivel y programación de hápticos con C++.

H3D API usa OpenGL para el renderizado de gráficos y los hápticos API (HAPI) para hápticos. HAPI es el motor de hápticos que suministra las características hápticas a la plataforma H3D API.

HAPI comprende tres partes principales, cada una de las cuales puede ser fácilmente ampliada para satisfacer las necesidades individuales:

- Manejo de dispositivos HAPI permitiendo trabajar con diferentes dispositivos hápticos.
- Hápticos basados en la geometría, que consta de tres sub partes:
  - Gestión de colisiones.
  - Algoritmo de representación háptica.
  - Algoritmo de interacción de superficie.
- Hápticos de espacio libre, con una colección de efectos de fuerza.

HAPI puede implementar cuatro algoritmos de renderizado de hápticos, dirigidos a dispositivos de tres grados de libertad: OpenHaptics SensAble, Chai3D; además de dos puntos H3D y renderes basados en esfera. Esto significa que los usuarios de H3D API son capaces de elegir entre cualquiera de estas formas de renderización de hápticos e incluso incluir sus propios algoritmos de representación por escrito.

HAPI también presenta la posibilidad de implementar un algoritmos de renderizado de hápticos de seis grados de libertad. [29]

#### 2.2.6.2 Python

Es un lenguaje de programación interpretado cuya filosofía hace hincapié en una sintaxis muy limpia y que favorezca un código legible.

Se trata de un lenguaje de programación multiparadigma, esto significa que más que forzar a los programadores a adoptar un estilo particular de programación, permite varios estilos: programación orientada a objetos, programación imperativa y programación funcional. Es un lenguaje interpretado, usa tipado dinámico y es multiplataforma.

Una característica importante de Python es la resolución dinámica de nombres; es decir, lo que enlaza un método y un nombre de variable durante la ejecución del programa (también llamado enlace dinámico de métodos).

Otro objetivo del diseño del lenguaje es la facilidad de extensión. Se pueden escribir nuevos módulos fácilmente en C o C++. Python puede incluirse en aplicaciones que necesitan una interfaz programable. [30]

#### 2.2.6.3 Desarrollo con H3D API

Una de las ventajas de H3D API es que usa X3D, el estándar abierto (con certificación ISO) de diseño de escenas gráficas; por esto la mayoría del software de gráficos se pueden guardar en formato X3D, que luego es posible importar y utilizar en H3D API, facilitando el trabajo con hápticos en escenas gráficas.

El desarrollo de programas con H3D API es de baja complejidad. El H3D no es muy diferente a la programación X3D, los archivos se guardan con la extensión x3d. [31] En la Figura 8 y Figura 9 se muestra un ejemplo simple desarrollado en H3D API.

```

<Group>
  <Shape>
    <Box DEF="MyBox" size="0.1 0.1 0.1" />
    <Appearance>
      <Material diffuseColor="1 0 0" />
      <FrictionalSurface dynamicFriction="0.5" />
    </Appearance>
  </Shape>
</Group>

```

Figura 8. Código para crear una caja con Fricción en la Superficie

Fuente [31]

En H3D API, Python se utiliza, además de X3D para expresar más conductas y animaciones de escena. El uso de X3D y del lenguaje interpretado Python elimina la necesidad de los ciclos de escritura-compilación-depuración de lenguajes compilados, y es posible reducir el tiempo de desarrollo (más de mitad) en comparación con el uso de sólo C++.

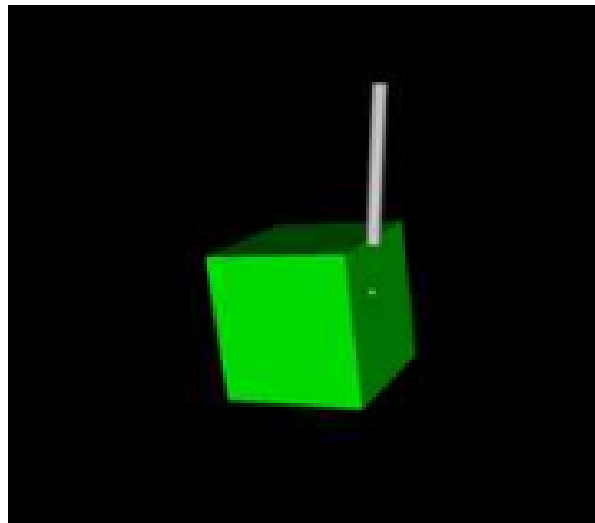


Figura 9. Ejemplo de Caja con Fricción en la Superficie

Fuente [31]

#### 2.2.6.4 Nodos Principales

H3DAPI contiene nodos especiales para superficies, fuerzas, etc. Se explican los principales a continuación.

- Superficies: [32]
  - DepthMapSurface: Es un H3DSurfaceNode que utiliza una textura 2D para determinar la profundidad de la superficie.
  - SmoothSurface: Define una superficies lisas, con dos campos de rigidez y amortiguación, que determina la rigidez y la velocidad de amortiguación de la superficie.
  - FrictionalSurface: Se hereda de SmoothSurface. FrictionalSurface tiene dos campos adicionales para determinar propiedades de fricción: staticFriction define la fricción que se experimenta después del movimiento inicial cuando se reclina sobre la superficie, mientras que dynamicFriction define la fricción que se experimenta cuando se mueve a lo largo de la superficie.
  - MagneticSurface: El MagneticSurface es una superficie en la que el objeto es atraído a la superficie, y las fuerzas se generan con el fin de mantener el objeto en la superficie.
  - OpenHapticsSurface: Trabaja con OpenHapticsRenderer.
- Efectos de Fuerza: [33]
  - ForceField: Un campo de fuerza añade una fuerza constante a la escena. Los campos de fuerza se agregan con el nodo de fuerza, que sólo tiene un campo propio: la fuerza, un campo con tipo SFVec3f que especifica la fuerza para hacer.

- MagneticGeometryEffect: El efecto de la geometría magnética trabaja una fuerza magnética y se implementa en el nodo MagneticGeometryEffect.
  - PositionFunctionEffect: Como su nombre lo indica, el efecto de la función de posición crea una fuerza en la escena controlada por una función de la posición. El nodo tiene campos xFunction, yFunction y zFunction que controla la fuerza en la x, y y z respectivamente. La fuerza generada es  $F = \langle xFunction, yFunction, zFunction \rangle$ .
  - SpringEffect; Los SpringEffect modelan fuerzas ejercidas por resorte y se añade a una escena con el nodo SpringEffect.
  - TimeFunctionEffect: El efecto de la función de tiempo crea una fuerza en la escena controlada por una función de tiempo. El nodo tiene campos xFunction, yFunction y zFunction que controla la fuerza en las x, y y z direcciones con respecto al tiempo. La fuerza generada es  $F = \langle xFunction, yFunction, zFunction \rangle$ .
- ToggleGroup: El nodo ToggleGroup permite a los usuarios activar o desactivar los gráficos y / o renderizado de hápticos de nodos hijos. Contiene los campos graphicsOn y hapticsOn para este propósito.[34]
  - PythonScript: El nodo PythonScript es un enlace para el guión de lenguaje de Python, que se puede utilizar para, por ejemplo, modificar escenas y gestionar eventos. Para utilizar Python se tendrá que añadir uno de estos nodos a la escena gráfica. El nodo PythonScript especifica una URL a donde se encuentra el verdadero código Python. [35]

- DeviceInfo: DeviceInfo es un nodo de X3DBindableNode que contiene los dispositivos que se utilizan con la API. Contiene, por ejemplo, todos los nodos H3DHapticsDevice que se utilizan para la renderización háptica, ratón y dispositivos de Magallanes. [36]



### **3. INGENIERÍA DEL PROYECTO**

En este capítulo se presenta de la forma en que se llevó a cabo el proyecto, estructurado en dos etapas: análisis y diseño del sistema.

#### **3.1. ANÁLISIS DEL PROBLEMA**

En esta etapa se definen las necesidades y requerimientos a tener en cuenta en el diseño del sistema, mediante la definición de los componentes, estructura y funcionamiento.

Para esto, es necesario establecer:

- Requerimientos del Sistema.
- Modelo Estructural del Sistema.

##### **3.1.1. Requerimientos del Sistema**

El sistema desarrollado, deberá contar con las siguientes características de funcionalidad:

- Integración de dos dispositivos hápticos Phantom Omni.
- Adaptación de dos pinzas laparoscópicas a los dispositivos hápticos.
- Realimentación de fuerza del sistema a los dispositivos.
- Fácil conexión del instrumental quirúrgico.
- Interacción de los botones con funciones específicas en el software.

### 3.1.2. Modelo Estructural del Sistema

Por medio de un diagrama de bloques representativo del sistema, se ilustran los componentes y subsistemas que interactúan en el mismo (Figura 10).

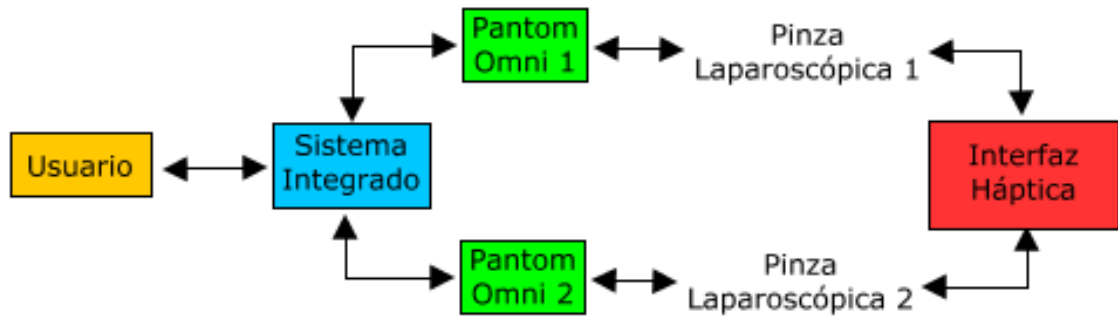


Figura 10. Arquitectura Interfaz

#### 3.1.2.1 Modelo Mecánico-Electrónico

Para la adaptación del instrumental quirúrgico a los dispositivos hápticos, se utilizó un conector estéreo hembra, logrando desarrollar el accionamiento de los botones (en este caso pulsadores de contacto en las pinzas). (Figura 11)

Además de desarrollar la adaptación, también fue necesaria la construcción de un modelo contenedor de los elementos físicos involucrados, donde se ubicaron los dispositivos hápticos y las pinzas laparoscópicas adaptadas. (Figura 12)

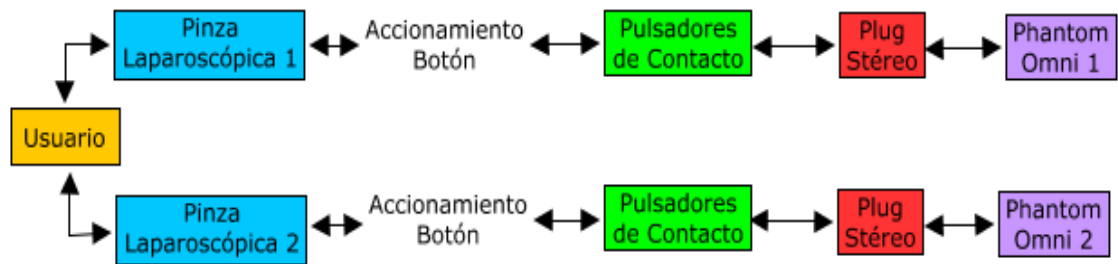


Figura 11. Arquitectura Estructura Mecánica/Electrónica

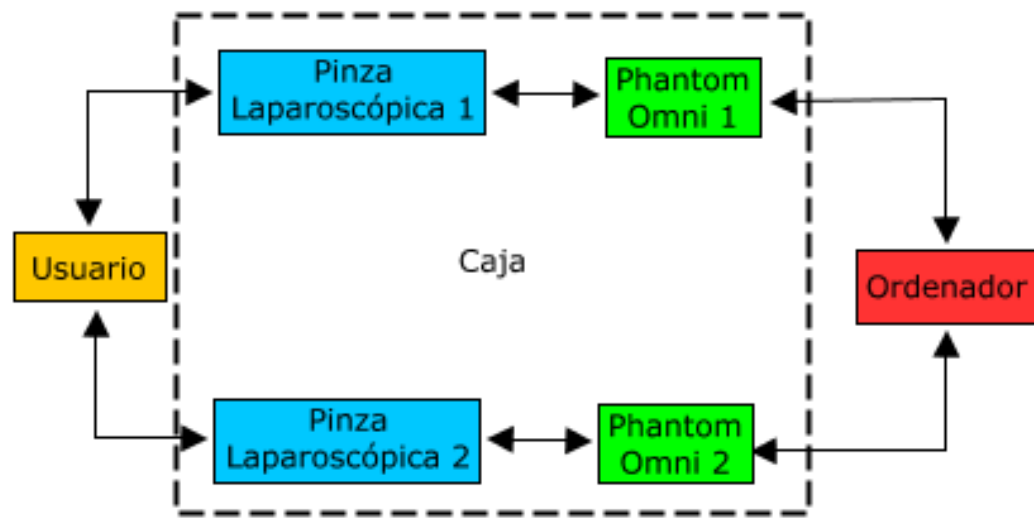


Figura 12. Esquema Físico del Sistema

### 3.1.2.2 Interfaz Háptica

La interfaz háptica se puede describir en tres subsistemas:

- Renderizado Háptico.
- Simulación.
- Renderizado de Gráficos.

#### 3.1.2.2.1 Renderizado Háptico

En este proceso se establecen los procesos de detección de colisiones (cursor del Phantom Omni con el entorno virtual), las fuerzas de realimentación (interacción de fuerzas entre el cursor y los modelos virtuales), acciones de los pulsadores (actividad asignada en el programa) y algoritmo de control (fuerza de retorno al dispositivo háptico).

#### 3.1.2.2.2 Simulación

Con la información de las colisiones y la respuesta de la fuerza, el motor de simulación calcula el comportamiento del entorno virtual por medio del tiempo de retorno de información a la detección de colisiones y al motor gráfico.

#### 3.1.2.2.3 Renderizado de Gráficos

Teniendo la información del motor de simulación, se construye el escenario gráfico con modelos simples de dos y tres dimensiones.

El esquema de la Figura 13 ilustra la estructura de la interfaz háptica a implementar.

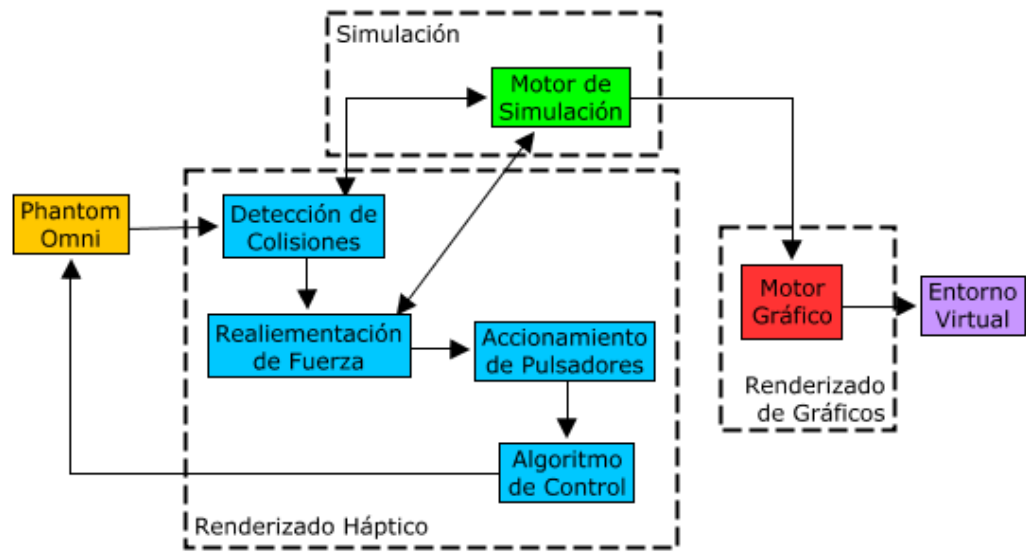


Figura 13. Esquema Interfaz Háptica

Además de los modelos anteriores, es necesario analizar el dispositivo háptico utilizada en el sistema.

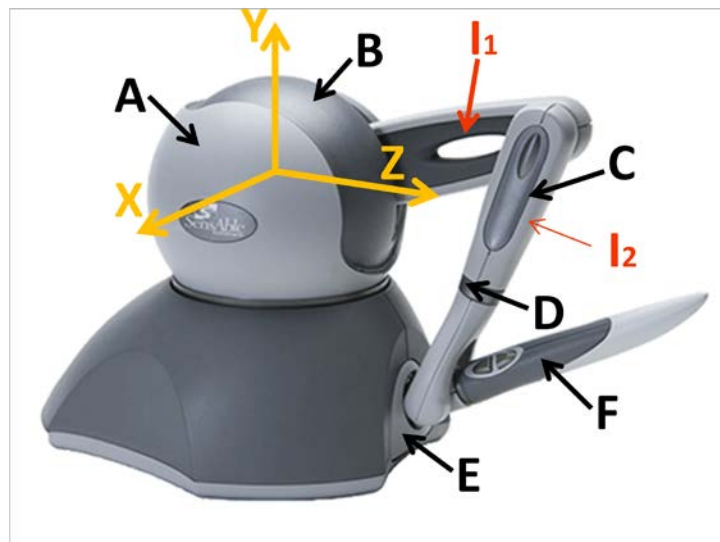


Figura 14. Sistema háptico Sensable Phantom Omni, Sistema Estructural

La Figura 14 identifica los componentes mecánicos principales del dispositivo Omni:

- El Elemento A (Cabeza) gira en torno al eje Y (Yaw), definiendo el ángulo  $\theta_1$ .
- Elemento B (Manivela) gira en torno al eje X (Pitch), definiendo el ángulo  $\theta_2$ .
- El Elemento C (Biela) gira en torno al eje relativo X' (Pitch), definiendo el ángulo  $\theta_3$ .
- Los Elementos D (Muñeca), la E (Tenedor) y la F (Stylus) giran alrededor de ejes ortogonales localizadas en E siendo ángulos Gimbal sin realimentación de fuerza.

Para simplificar el estudio estructural de la cinemática del Omni, el análisis se extiende sólo al punto final donde la realimentación de fuerza es transmitida, eliminando los tres elementos gimbal. Estos ángulos gimbal solamente son usados para indicar una orientación de un posible instrumento virtual. [37]

### 3.1.2.3 Estudio Cinemático

A continuación se presenta el análisis cinemático del dispositivo háptico Phantom Omni.

#### 3.1.2.3.1 Cinemática Directa

El objetivo es calcular la matriz que define el comportamiento del dispositivo en función de cada uno de los ángulos de su correspondiente articulación  $i$ . Se trata por tanto de definir la matriz de traslación  $T_{04}$  del dispositivo desde CSO hasta el

fector final (EE) Figura 15. Cuando esta matriz de transformación esté disponible la derivada parcial de  $T_{04}$  () respecto de  $1, 2, 3$  producirá la matriz Jacobiana.

La Figura 15 representa el conjunto de los distintos sistemas de coordenadas situados en cada articulación. Nuestro cálculo consistirá en realizar una secuencia de transformación desde el CSO hasta el EE atravesando la cadena de cinemática CSO-CS1-CS2-CS3-EE. CS1 es el sistema de coordenadas asociado al elemento 'Cabeza'; CS2 es el sistema de coordenadas asociado al elemento 'Manivela'; CS3 es el sistema de coordenadas asociado al elemento 'Biela'. La expresión de la posición del EE en coordenadas cartesianas en función de los ángulos de las articulaciones  $i$  es:

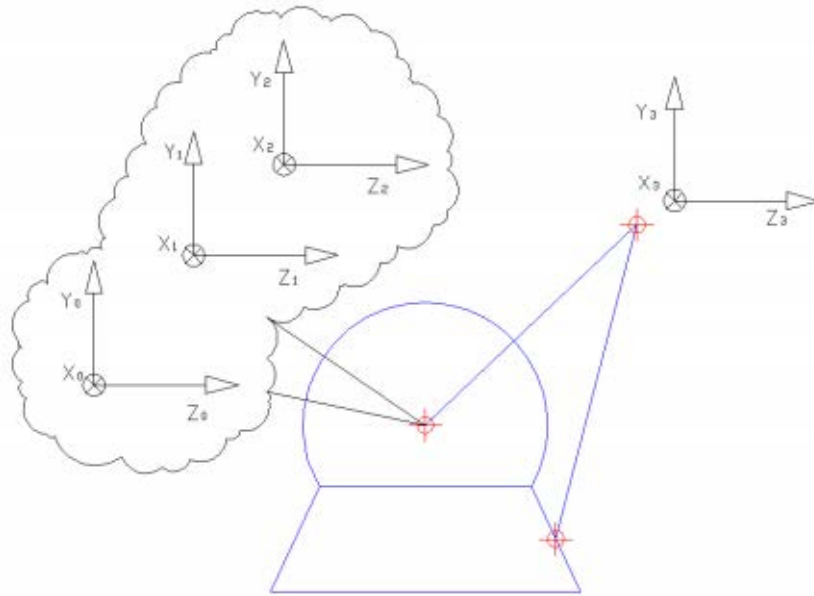


Figura 15. Sistemas de coordenadas CS0, CS1, CS2 y CS3 definidos en el estudio del Dispositivo Phantom Omni

Fuente [20]

La matriz de transformación de CSO a CS2 excluyendo el giro 2.

$$T_{03} = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Incluyendo 2 obtenemos la matriz de transformación entre CS2 y CS3

$$T_{23} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_3 & \sin \theta_3 & l_1 \sin \theta_2 \\ 0 & -\sin \theta_3 & \cos \theta_3 & l_1 \cos \theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Por lo tanto la matriz de transformación de CSO a CS3:

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \sin \theta_3 & \cos \theta_3 \sin \theta_1 & l_1 \cos \theta_2 \sin \theta_1 \\ 0 & \cos \theta_3 & \sin \theta_3 & l_2 + l_1 \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_1 & -\cos \theta_1 \sin \theta_3 & \cos \theta_1 \cos \theta_3 & -l_1 + l_1 \cos \theta_2 \cos \theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La traslación de la articulación CS3 a EE:

$$T_{34} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Finalmente la matriz de transformación T<sub>04</sub> desde EE respecto al CSO.

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \sin \theta_3 & \cos \theta_3 \sin \theta_1 & l_1 \cos \theta_2 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3 \\ 0 & \cos \theta_3 & \sin \theta_3 & -l_2 \cos \theta_3 + l_1 \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_1 & -\cos \theta_1 \sin \theta_3 & \cos \theta_1 \cos \theta_3 & l_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



Donde la sub-matriz R04, es la matriz de rotación del sistema:

$$R_{04} = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \sin \theta_3 & \cos \theta_3 \sin \theta_1 \\ 0 & \cos \theta_3 & \sin \theta_3 \\ -\sin \theta_1 & -\cos \theta_1 \sin \theta_3 & \cos \theta_1 \cos \theta_3 \end{pmatrix}$$

Por último las coordenadas del EE referidas al CSO son la última columna de T04:

$$x = (l_1 \cos \theta_2 + l_2 \sin \theta_3) \sin \theta_1$$

$$y = l_1 \sin \theta_2 - l_2 \cos \theta_3$$

$$z = (l_1 \cos \theta_2 + l_2 \sin \theta_3) \cos \theta_1$$

### 3.1.2.3.2 Cinemática Inversa

Este estudio consiste en la expresión de los ángulos  $i$  de cada articulación en función de la posición del EE en coordenadas cartesianas:

$$(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = I(x, y, z)$$

La Figura 16 se muestra las relaciones geométricas entre estas variables.

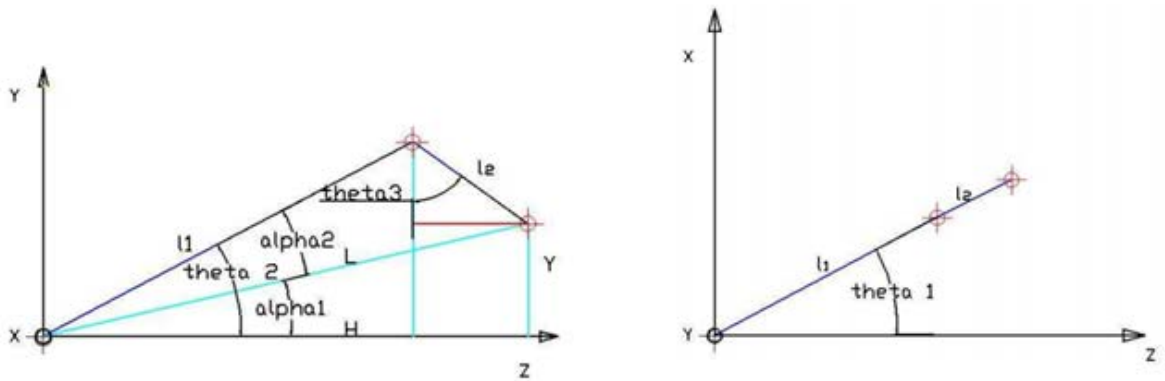


Figura 16. Relaciones geométricas entre EE y el CSO

Se aplicará el teorema del coseno Figura 17, es decir, el cuadrado del lado opuesto a un ángulo agudo es igual a la suma de los cuadrados de los otros dos lados menos el doble producto de ellos por el coseno del ángulo comprendido.

De esta manera se obtiene:

$$b^2 = c^2 + a^2 - 2ac * \cos B$$

Aplicándolo al sistema, se obtiene que:

$$\theta_1 = -\arctan\left(\frac{x}{z}\right);$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{y}{H}\right) + \arccos\left(\frac{L^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1L}\right);$$

$$\theta_3 = -\arctan\left(\frac{H - l_1 \cos \theta_2}{l_1 \sin \theta_2 - y}\right)$$

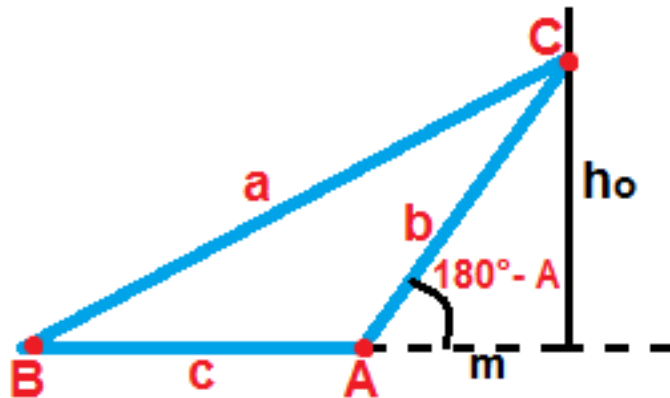


Figura 17. Figura del Teorema del Coseno

### 3.1.2.3.3 Matriz Jacobiana

Dada una función  $F: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  con  $m$  componentes  $y_1$  a  $y_m$  cada uno de ellos con  $n$  variables independientes  $x_1$  a  $x_n$ , el Jacobiano es la matriz de derivadas parciales de cada  $y_i$  respecto de cada una de las  $x_i$ .

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial y_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial y_m}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial y_m}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

También se puede decir que del Jacobiano obtenemos la mejor aproximación lineal del valor de la función  $F$  en las cercanías del punto  $P$ :

$$F(x) \sim F(p) + J_F(p) * (x - p)$$

El Jacobiano es una matriz construida en dos partes. La mitad superior representa la relación que existe entre las velocidades lineales del extremo del manipulador con la velocidad angular de cada uno de las articulaciones, simplificado en la ecuación:

$$V = J_u * \frac{d\theta}{dt}$$

La mitad inferior de la matriz no es usada en el cálculo de la Manipulabilidad, pero representa la relación que existe entre la velocidad angular del extremo del manipulador con la velocidad angular de cada uno de las articulaciones:

$$\omega = J * \frac{d\theta}{dt}$$

La matriz Jacobiana es de gran ayuda en el análisis y el control del movimiento de un manipulador en cuanto a la determinación de configuraciones singulares, en las cuales para un pequeño cambio de posición sería necesario una energía (en fuerza o momento) muy elevada, o bien configuraciones desde las cuales algunas direcciones son inalcanzables, por lo tanto el jacobiano nos indica zonas donde no estamos interesados que el dispositivo trabaje.

El cálculo de la Manipulabilidad a partir del Jacobiano determinará que el espacio de trabajo real del dispositivo no presenta pozos de puntos singulares en su zona habitual de funcionamiento, dado que un punto singular conduce a una solución no realizable del problema de la cinemática inversa. Cerca de los puntos singulares, las acciones del manipulador son indeterminadas, y para la correspondiente combinación de  $i$  el valor del determinante Jacobiano es nulo.

Dado  $d/dt$  como valor conocido aplicado por los motores en las articulaciones y determinado por el sistema de control a través de los codificadores de posición, una vez calculado  $J_u$ , deberemos ser capaces de obtener una medida de la velocidad lineal en el extremo del manipulador.

En el caso del Phantom Omni, la matriz superior del jacobiano  $J_u$  tiene la forma de  $J$  ( $3 \times n$ ) siendo  $n$  el número de grados de libertad y función de las  $i$ , es decir de todas las articulaciones que consideramos que son las que tienen realimentación de fuerza.

Los cálculos se han realizado con la herramienta de software Mathematica con los paquetes Screws y RobotLinks. Se obtiene la matriz Jacobiana: [37]

$$J = \begin{pmatrix} l_1 \cos \theta_2 + l_2 \sin \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & l_1 \cos(\theta_2 - \theta_3) & 0 \\ 0 & -l_1 \sin(\theta_2 - \theta_3) & l_2 \\ 0 & 0 & -1 \\ \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

## 3.2. DISEÑO

Se describe el procedimiento para realizar el diseño del sistema a construir. Se procedió de la siguiente manera:

1. Diseño Conceptual
2. Diseño Detallado

### 3.2.1. DISEÑO CONCEPTUAL

Para poder tomar decisiones sobre el diseño final del sistema, es necesario recolectar información sobre el proyecto.

Es necesaria la identificación y delimitación del problema, para esto (junto con las características descritas en el capítulo anterior) se realizó una visita a la Facultad de Medicina de la UMNG, en el Hospital Militar; para conocer sobre los sistemas de simulación con los que cuenta la institución, sus características y funcionamiento.

Se encontraron modelos de cuerpo humanos, adultos y bebés, de los dos sexos. Estos contaban con medios que simulaban características de los sistemas cardíaco, respiratorio y nervioso. Con estos modelos, los estudiantes de medicina pueden entrenarse en diversos procedimientos médicos.

Además de estos modelos, la Facultad de Medicina cuenta con simuladores laparoscópicos, algunos con objetos reales proyectados a una pantalla con una cámara, con los cuales se interactúa directamente con instrumental quirúrgico laparoscópico. Otro simulador, cuenta con un sistema hidráulico, conectado a las pinzas, el cual está vinculado a un software de entrenamiento de algunos procedimientos quirúrgicos, visualizados en una pantalla.

En la Figura 18 se observan algunos de los simuladores con los que cuenta la UMNG para el entrenamiento de sus estudiantes de medicina.

Habiendo conocido los simuladores descritos anteriormente, se tomó la decisión de construir la base de un futuro simulador, adaptando instrumental laparoscópico a dispositivos hápticos Phantom Omni, desarrollando un software de realidad virtual, donde el usuario interactúe con modelos virtuales y así afiance las habilidades del futuro profesional, en el uso de las mismas.



Figura 18. Unidades entrenadoras Facultad de Medicina UMNG

### 3.2.2. DISEÑO DETALLADO

Se describe el desarrollo del diseño del sistema, estructurado de la siguiente forma:

- Diseño Electrónico/Mecánico.
- Diseño de Software.
- Diseño del Protocolo Experimental.

#### 3.2.2.1 DISEÑO ELECTRÓNICO/MECÁNICO

Con el propósito de afianzar las habilidades de manejo de las pinzas laparoscópicas, integradas en los dispositivos hápticos Phantom Omni, disponibles en el Centro de Realidad Virtual de la Universidad Militar Nueva Granada, se desarrolla el sistema, como la base de un futuro simulador laparoscópico.

Para poder integrar las pinzas de cirugía a los dispositivos hápticos, fue necesario realizar modificaciones electrónicas y mecánicas al instrumental. Conociendo esto, se propuso el diseño electrónico descrito a continuación:

El dispositivo háptico Phantom Omni, en su extremo final, posee un conector estéreo que permite la unión de diferentes grippers a este mismo como se ilustra en la Figura 19.

Inicialmente, por características de fábrica, está vinculado a un lápiz (Stylus) que permite la interacción con entornos virtuales, integrando actividades que involucran los dos botones que posee (Figura 20).



Figura 19. Conector Estéreo Phantom Omni



Figura 20. Stylus Phantom Omni

Conociendo esto, se diseñó un sistema que integra un conector estéreo hembra, el cual se conectará con el conector estéreo macho del dispositivo háptico Phantom, conduciendo así el voltaje hacia unos pulsadores, ubicados en las pinzas laparoscópicas, que permitirán la interacción del instrumental con el entorno virtual, por medio del software.

En la Figura 21 y Figura 22 se observa el diagrama del sistema electrónico implementado.



Figura 21. Esquema Electrónico



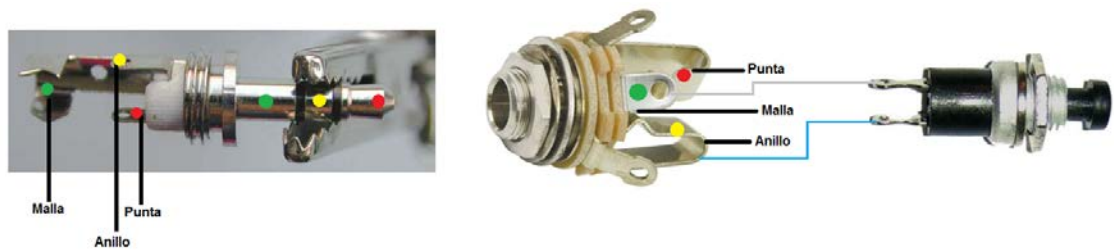


Figura 22. Esquema Electrónico Detallado

Para integrar este sistema a las pinzas, fue necesaria una modificación mecánica en el instrumental laparoscópico:

#### 3.2.2.1.1 Endo Dissect

Para desarrollar la modificación, se desarrolló el modelo CAD de la pinza en el Software SolidWorks 2012 (Figura 23).

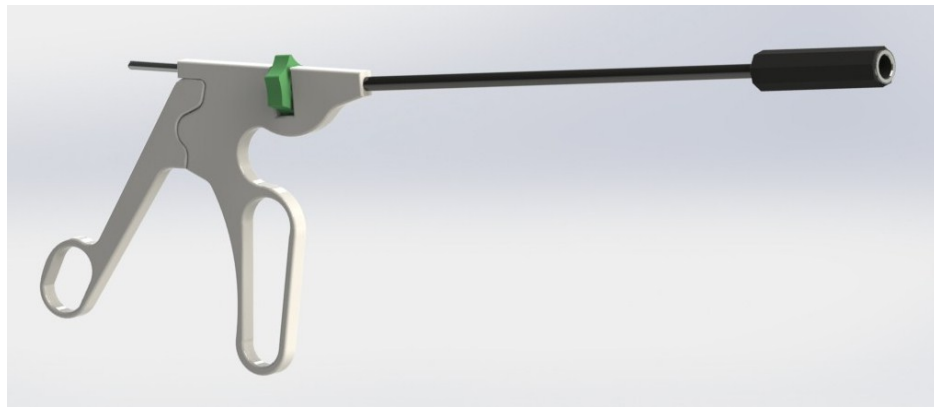


Figura 23. Modelo CAD de Pinza Endo Dissect

Como se visualiza en la Figura 24; se ubicó el conector estéreo hembra en la punta del instrumental, para facilitar el manejo de los dispositivos hápticos conectados a este.

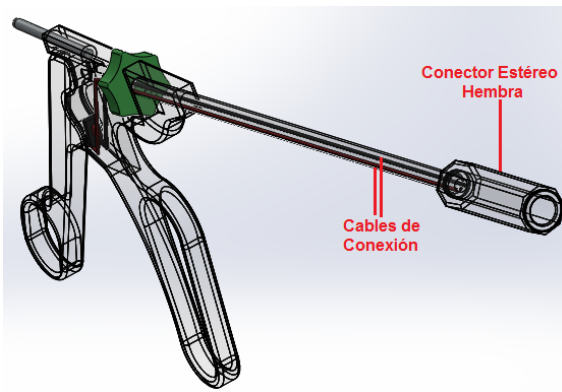


Figura 24. Modelo CAD Endo Dissect (Conector Estéreo Hembra)

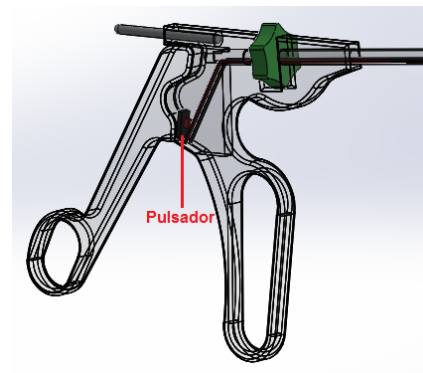


Figura 25. Modelo CAD Endo Dissect (Ubicación Pulsador)

Ya que esta pinza, no maneja actividades diferentes al agarre de objetos; se ubicó un pulsador en la intersección de las manijas de la pinza, para que al cerrarse, se haga contacto con el botón, y se envíe una señal al háptico por medio del conector estéreo como se muestra en la Figura 25.

#### 3.2.2.1.2 Electrobisturi Valleylab Ligasure

Para desarrollar la modificación, se desarrolló el modelo CAD de la pinza en el Software SolidWorks 2012 como se muestra la Figura 26.

Se realizó la adaptación del conector estéreo hembra la punta del instrumental, para facilitar el manejo de los dispositivos hápticos conectados a este (Figura 27).



Figura 26. Modelo CAD de Electrobisturi Valleylab Ligasure

Esta pinza, permite el agarre de objetos y la cauterización de tejidos; por lo que fue necesaria la ubicación de dos pulsadores: el primero intersección de las manijas de la pinza, y el segundo en la parte posterior, se puede visualizar la ubicación en la Figura 28. Al pulsarse los botones, se envía información al dispositivo háptico por medio del conector estéreo.

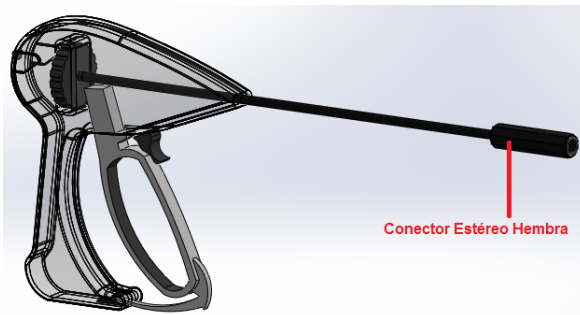


Figura 27. Modelo CAD Electrobisturi Valleylab Ligasure (Conector Estéreo Hembra)

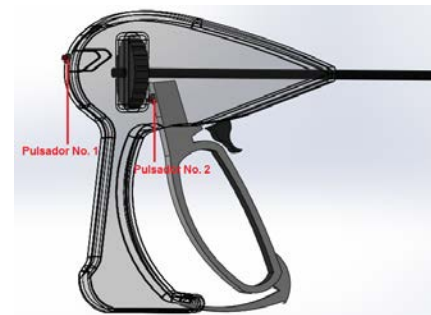


Figura 28. Modelo CAD Electrobisturi Valleylab Ligasure (Ubicación Pulsadores)

Con las pinzas modificadas, es necesaria la construcción de una maqueta contenedora de los elementos del sistema.

Se propuso una caja que contuviera los dispositivos hápticos en su interior, como se muestra en la Figura 29. Las dimensiones de la misma se especifican en el Anexo 1.

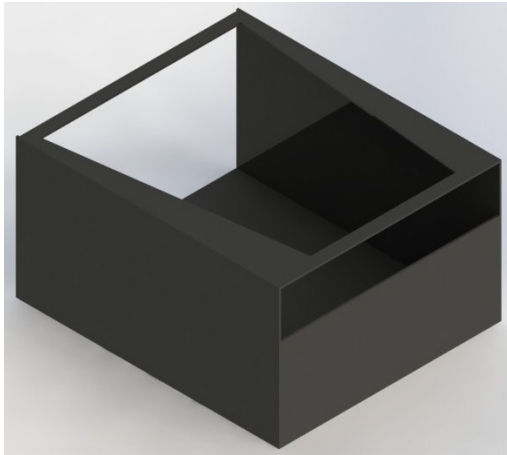


Figura 29. Modelo CAD Caja Contenedora



Figura 30. Modelo CAD Tapa Superior

Para la sección superior, envolviendo el modelo en el área de la simulación laparoscópica; se propuso una silueta de un abdomen humano masculino, con orificios donde se insertarían las pinzas, conectándose en el interior con los dispositivos hápticos (Figura 30).

Finalmente, el sistema contenedor, tendría el diseño ilustrado en la Figura 31.

Y la Figura 32, muestra el sistema completo, con la implementación de las pinzas a la caja.

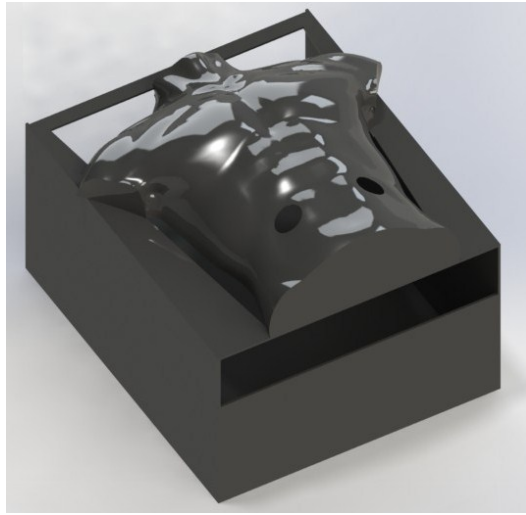


Figura 31. Modelo CAD Caja Total

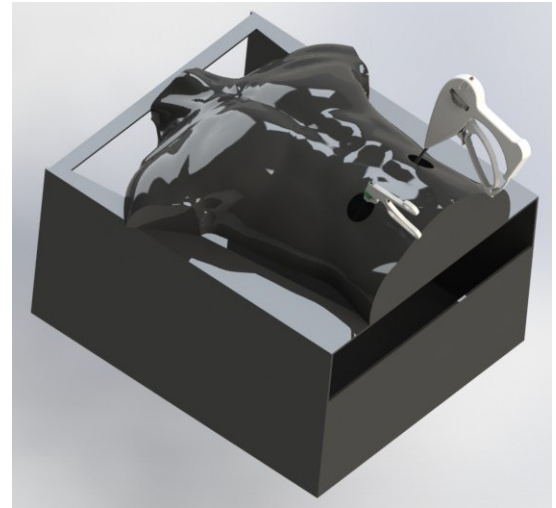


Figura 32. Modelo CAD Caja Total con las Pinzas Adaptadas

### 3.2.2.2 DISEÑO DE SOFTWARE

El software a desarrollar tiene como objetivo la implementación de aplicaciones donde el usuario pueda interactuar con las pinzas laparoscópicas adaptadas a los dispositivos hápticos y con elementos virtuales presentes en el programa.

Estas aplicaciones se implementan para evaluar el comportamiento de las pinzas adaptadas.

Para iniciar el desarrollo se decidió la interfaz de desarrollo de aplicación API Háptico a usar, inicialmente se propuso el trabajo en el Software Sofa, pero debido a errores y fallos del sistema, se escogió el desarrollador H3DAPI, plataforma abierta de desarrollo de ambientes.

Inicialmente, se desarrollaron aplicaciones sencillas y básicas, por medio de las cuales se aprendió sobre el uso de geometrías, texturas, sensores de tacto,

colisiones, movimiento de piezas dentro del entorno virtual con los dispositivos Phantom Omni.

A continuación se describe una de las aplicaciones desarrolladas:

Consistía en la utilización de dos dispositivos hápticos Phantom Omni, colisionando con unos modelos básicos (esferas). El entorno es el de la Figura 33.

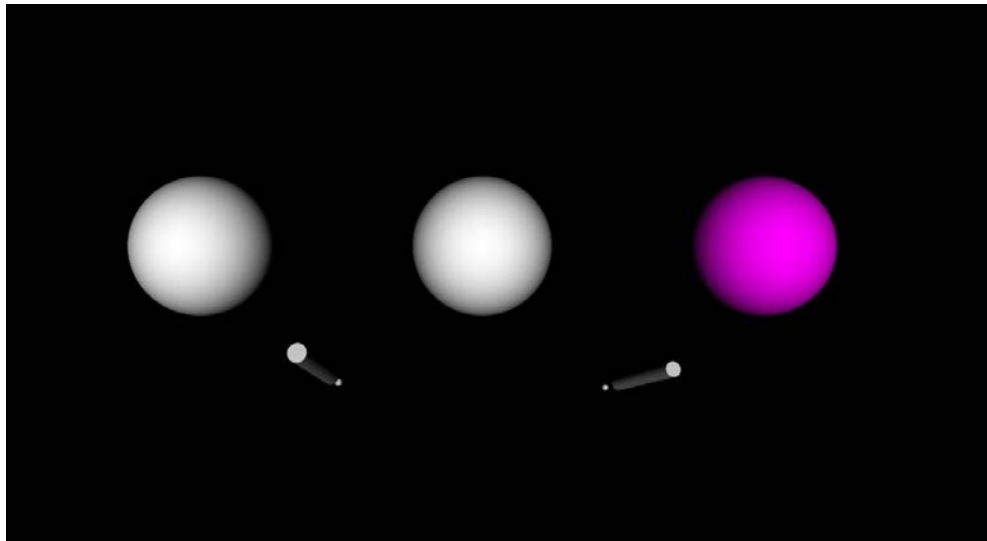


Figura 33. Aplicación Colisiones Phantom Omni

Al colisionar con los objetos, se genera una realimentación de tacto sobre los objetos.

Seguidamente, se procedió aprender la asignación de funciones a los botones del Stylus de los dispositivos hápticos. En esta aplicación, se desarrolló una relación gráfica con el accionamiento de los botones; designando que al oprimir un botón, las esferas colisionadas, cambiaran de color como lo muestra la Figura 34.

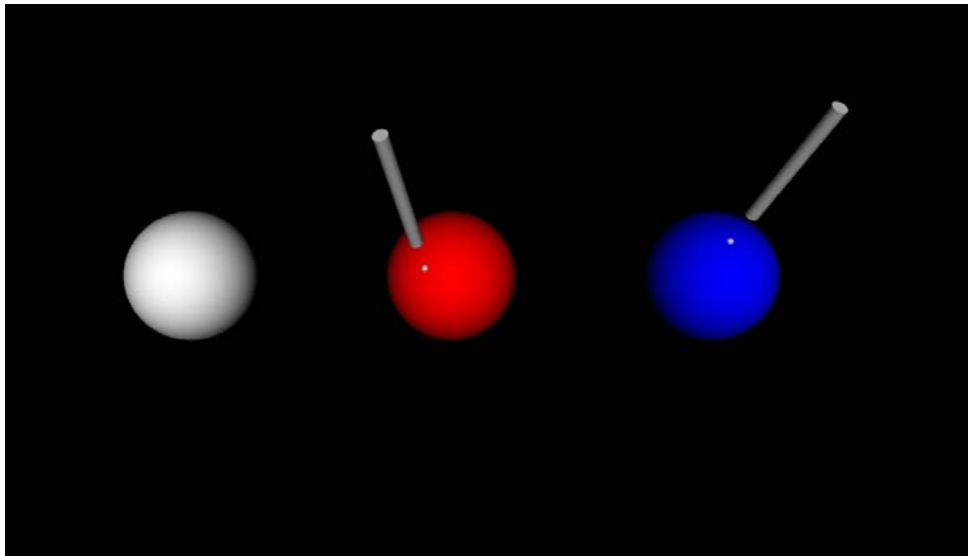


Figura 34. Aplicación Botones Phantom Omni

Habiendo desarrollado estas aplicaciones, se contaba con el conocimiento necesario para desarrollar las aplicaciones de software del sistema. Este, se estructuró en tres juegos de destreza:

- Ubicación de Píldoras.
- Limpieza de Vena.
- Navegación y Recolección.

#### 3.2.2.2.1 Ubicación de Píldoras

En ese juego, se visualizan píldoras y recipientes de diferentes colores. Consiste en ubicar las piezas, en el contenedor respectivo. El entorno gráfico, es el que se muestra en la Figura 35.

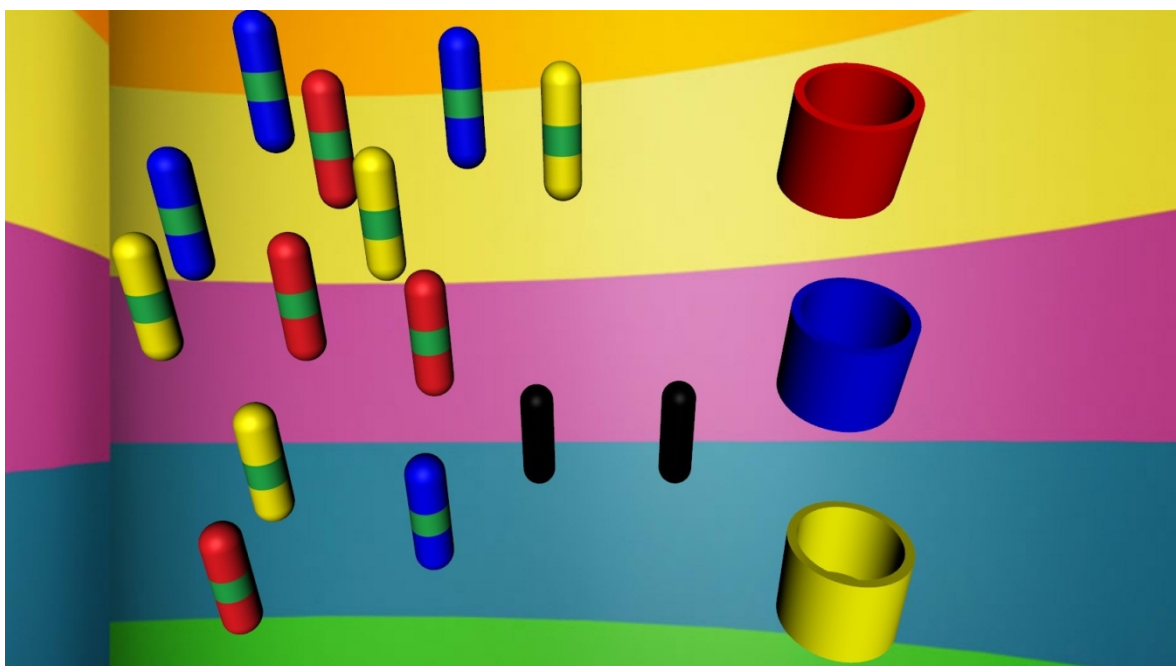


Figura 35. Aplicación “Ubicación Píldoras” Software.

Para lograr una mayor inmersión del usuario en la aplicación, esta contiene un elemento de sonido, que se escucha durante el desarrollo del juego.

Para trasladar los modelos virtuales, es necesario oprimir un botón en las pinzas. Cada color, tiene asignado un botón del instrumental.

En el desarrollo del programa, intervienen los módulos X3D y Python, junto a otros elementos que hacen posible su funcionamiento.

La Figura 36 ilustra el esquema general de la aplicación. En este, se observa los componentes principales que intervienen en la escena: dispositivos hápticos, gráficos, sonidos, etc. y los nodos y elementos que permiten las colisiones, el desplazamiento y accionamiento de los botones; logrando así la consecución del objetivo del juego.



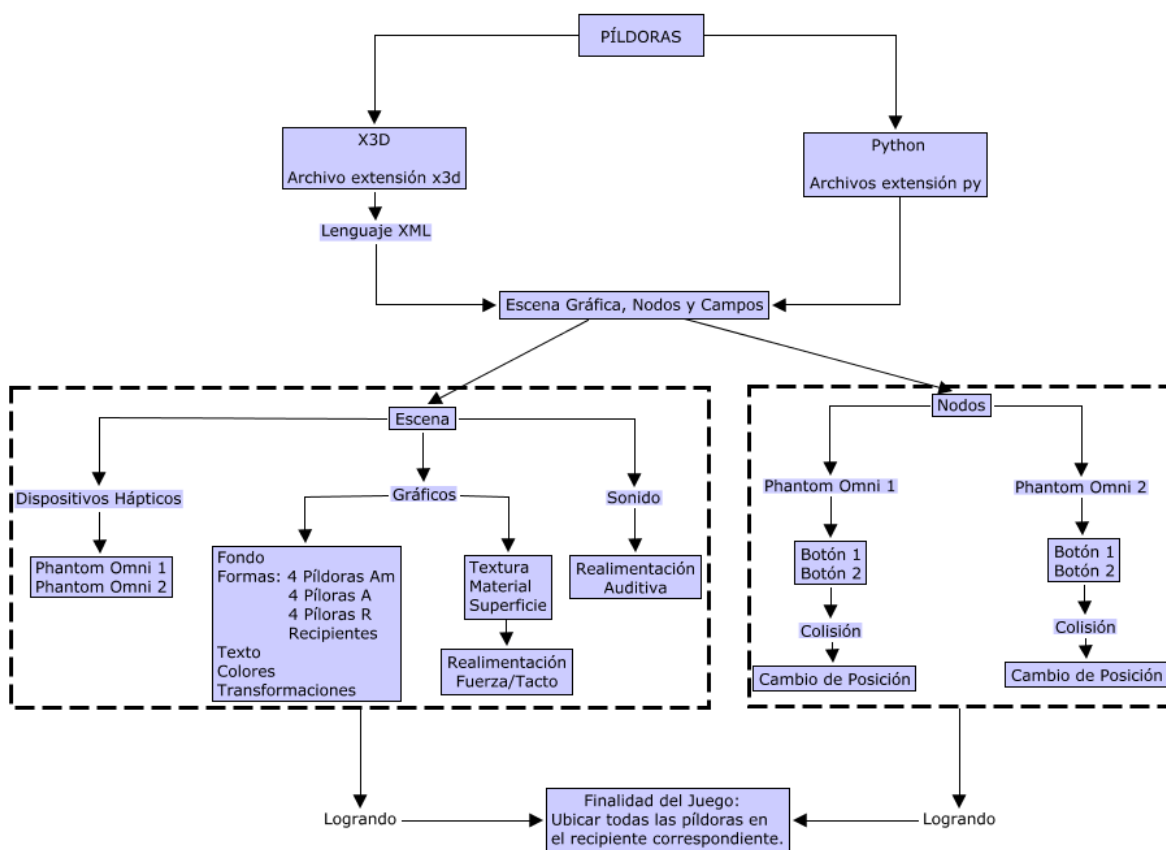


Figura 36. Esquema del Programa “Ubicación Píldoras”.

### 3.2.2.2.2 Limpieza de Vena

Se desarrolló un ambiente virtual, con componentes biológicos del cuerpo humano, como glóbulos rojos, glóbulos blancos y partículas de grasa; los cuales se visualizan en la Figura 37.

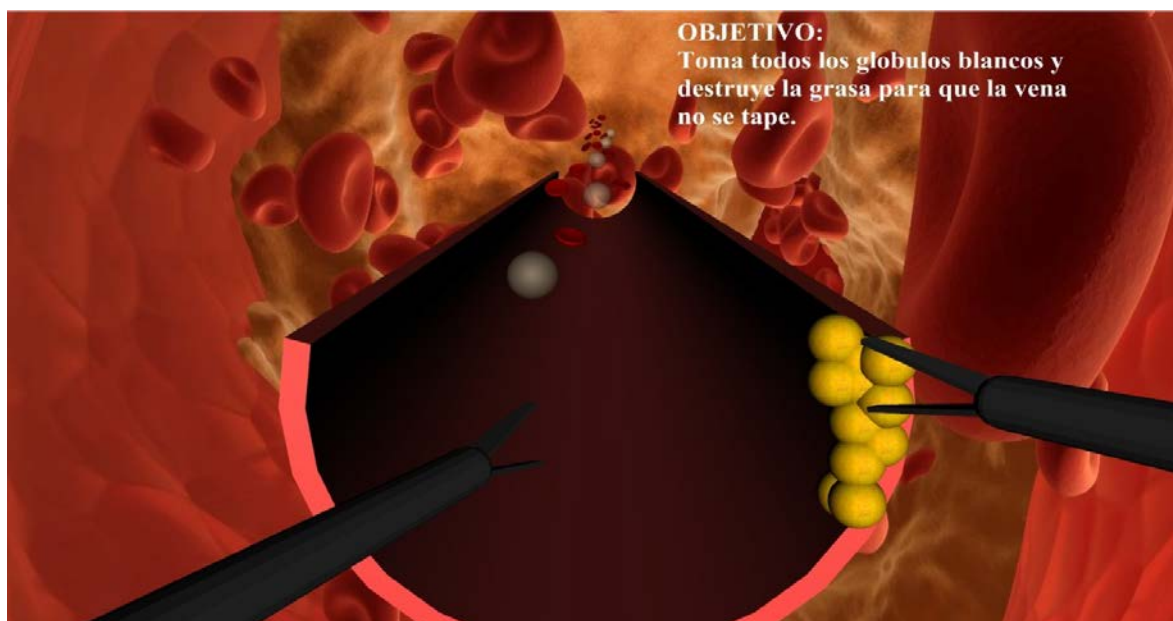


Figura 37. Aplicación “Limpieza Venas” Software.

El objetivo de la aplicación es: Atrapar los glóbulos blancos (pulsando el botón de la pinza Endo Dissect), destruir las partículas de grasa (pulsando un botón de la pinza Electrobisturi Valleylab Ligasure) y evadir los glóbulos rojos.

Los modelos que representan los glóbulos rojos y blancos, están en movimiento, cayendo a través de la vena, aumentando la velocidad de movimiento progresivamente.

Al hacer contacto con los modelos virtuales, se genera una realimentación de tacto en los dispositivos hápticos, aumentando del grado de inmersión del usuario en la escena, además del sonido que se implementa durante la realización de la actividad.

La Figura 38 ilustra el esquema general de la aplicación, con los componentes principales que intervienen en la misma.

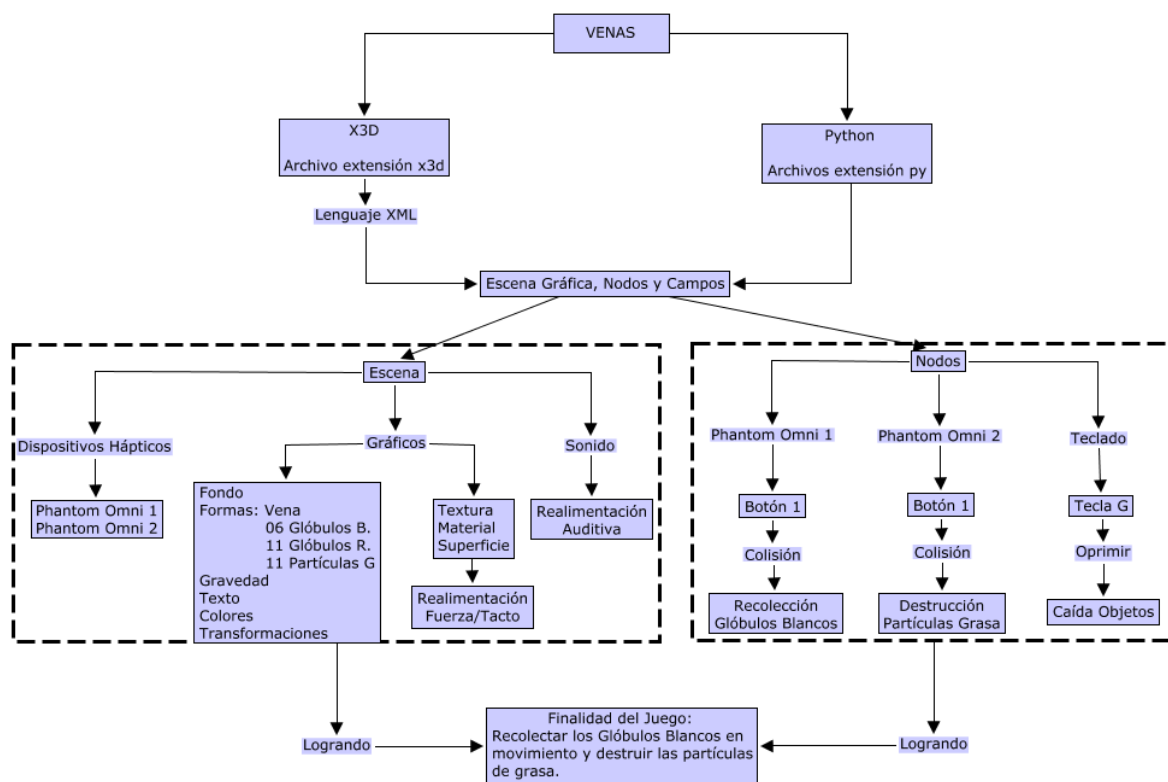


Figura 38. Esquema del Programa “Limpeza Venas”.

### 3.2.2.2.3 Navegación y Recolección

Esta aplicación contiene modelos en 2D de vasos y órganos humanos. Los modelos de los órganos estarán ocultos bajo los vasos; y estos están distribuidos en todo el espacio virtual.

Para navegar a través del entorno, el usuario deberá accionar el botón interno de la pinza laparoscópica Electrobisturi Valleylab Ligasure y moverla para cambiar el enfoque y posición de cámara. Y para recolectar los órganos, se accionará el botón de la pinza Endo Dissect.

El entorno descrito anteriormente, se puede visualizar en la Figura 39.

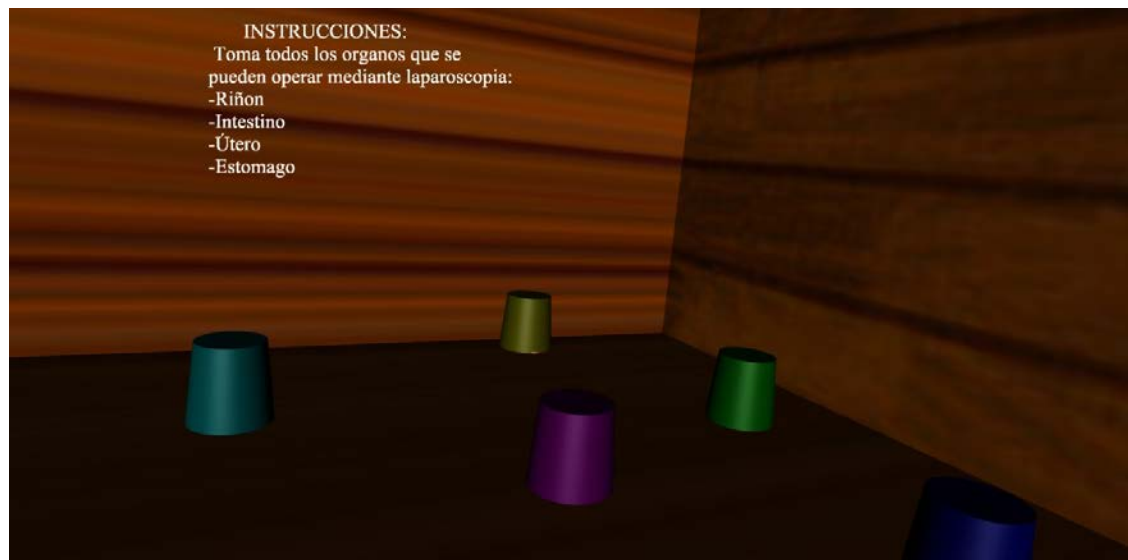


Figura 39. Aplicación “Navegación y Recolección” Software.

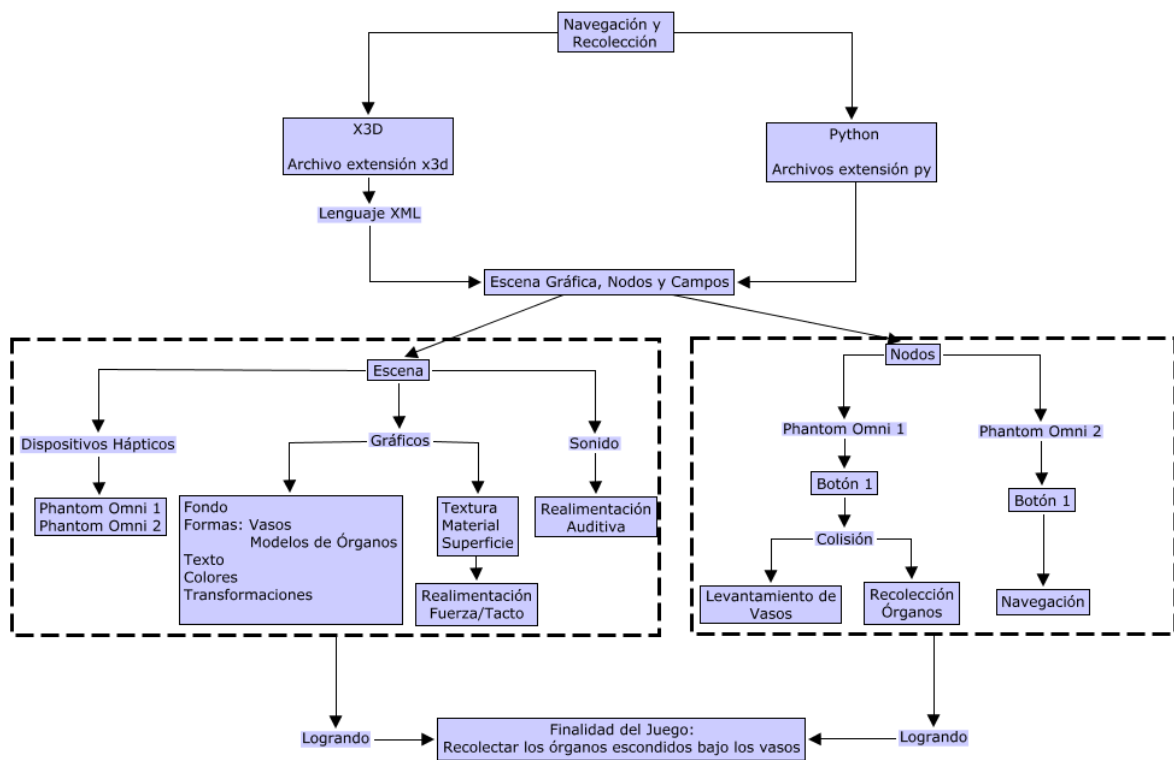


Figura 40. Esquema del Programa “Navegación y Recolección”

Se explica la estructura de la aplicación por el esquema descrito en la Figura 40.

En el Anexo 2 se encuentran diagramas de dependencia de cada una de las aplicaciones desarrolladas, en ellos se pueden observar las funciones y nodos principales de cada juego. Los bloques y líneas rojas, representan funciones desarrolladas en Python y los azules X3D.

En el Anexo 3 se describe un manual detallado, para el uso de las aplicaciones.

### 3.2.2.3 PROTOCOLO EXPERIMENTAL

Para poder evaluar el dispositivo implementado, es necesario establecer un método para obtener datos del uso del sistema. El usuario deberá completar las actividades descritas anteriormente, en el menor tiempo posible; demostrando la mejoría en las habilidades con el mayor número de repeticiones.

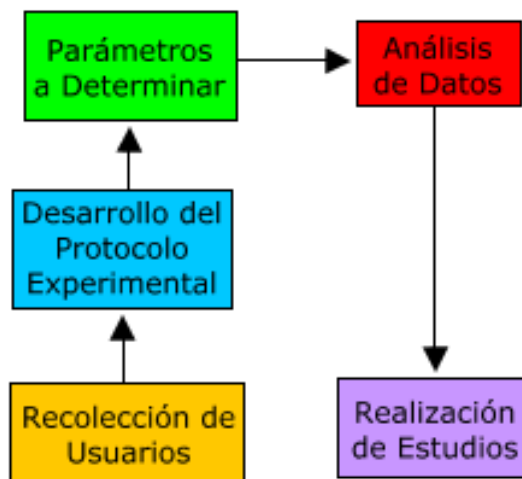


Figura 41. Estructura de Evaluación del Sistema

#### 3.2.2.3.1 Parámetros del Sistema

- Las tareas a realizar consisten en la colisión, arrastre, toma de los modelos presentes en los juegos, en los escenarios virtuales de cada uno de ellos.
- Se realizarán tres repeticiones diarias de cada actividad, durante tres días.
- Se agruparán los usuarios en dos conjuntos: experimental de diez personas, y de control con dos personas.
- La variable a medir será el tiempo que el usuario tome en completar cada actividad para las aplicaciones “Ubicación Píldoras” y “Navegación y Recolección”.
- En el juego “Limpieza Vena” se medirán el número de partículas que el usuario logre recolectar y/o destruir dentro del tiempo de ejecución de la aplicación.

#### 3.2.2.4 Desarrollo del Protocolo

Las actividades se desarrollaron en forma de juegos para llamar la atención del usuario, y así desarrollar la prueba a gusto. Para evaluar el sistema, se recluta un número de personas que cumplan con los objetivos de las aplicaciones; de esta manera se recolectan datos de ejecución para así, realizar el análisis de datos de los mismos.

#### 3.2.2.5 Reclutamiento de Usuarios

Se determinaron dos grupos para realizar el posterior análisis: un grupo experimental y un grupo de control, el cual sería la base para la evaluación del experimental. El grupo experimental está compuesto por diez personas, reclutadas de manera voluntaria, las cuales no tenían interacción previa con las aplicaciones

a desarrollar. Por otro lado, el grupo de control está integrado por los desarrolladores de este proyecto, los cuales tienen un amplio conocimiento en la ejecución de las aplicaciones.

#### 3.2.2.6 Ejecución de Pruebas

Las pruebas se realizarán en tres días. Cada día, el usuario tendrá tres intentos para lograr el objetivo de cada aplicativo. Antes de comenzar a tomar los datos a evaluar, al grupo experimental, se le dará una explicación del funcionamiento de los juegos a desarrollar; además tendrán un tiempo breve de interacción del instrumental con la interfaz virtual para familiarizarse, antes de registrar los resultados.

El individuo, realizará las pruebas diarias de la siguiente forma: Iniciará con la aplicación “Ubicación Píldoras”, seguidamente de “Limpieza Vena” y finalizando con “Navegación y Exploración”. Contará con un minuto de descanso entre cada intento, (con el fin de no saturar al usuario) para luego iniciar las prueba nuevamente; completando el ciclo al haber desarrollado la rutina tres veces.

#### 3.2.2.7 Análisis de Datos

Teniendo los datos registrados de las pruebas realizadas, se analizarán las variables descritas anteriormente, por medio de pruebas estadísticas como ANOVA (Análisis de Varianza) y Prueba T de Student; todo esto para verificar que hubo aprendizaje, y el sistema realizó el entrenamiento a los usuarios.

## 4. DESARROLLO

En este capítulo se describe el proceso de construcción y ejecución del proyecto, teniendo en cuenta el diseño descrito en el capítulo anterior.

### 4.1. SISTEMA ELECTRÓNICO/MECÁNICO

Para la adaptación del módulo estéreo a la pinza, fue necesario abrir las pinzas, y desglosar sus componentes como se muestra en la Figura 42.



Figura 42. Componentes Pinza Endo Dissect

Se insertó el pulsador en la zona donde se hace contacto al cerrar y abrir el instrumental, y se soldaron las conexiones a el mismo. Los cables que conectan el botón con el conector estéreo hembra se introdujeron dentro de de la varilla principal de la pinza. Este procedimiento es el que se describe en la Figura 43 y Figura 44.





Figura 43. Ubicación del Pulsador en la pinza

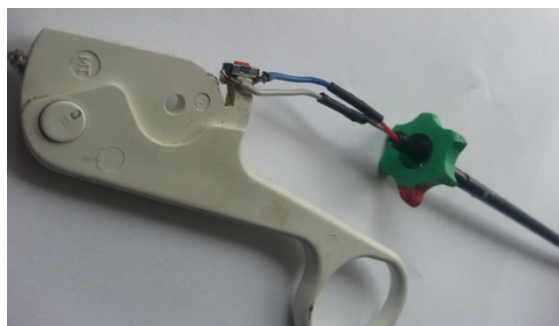


Figura 44. Instalación del cableado

Finalmente, la pinza adaptada al dispositivo háptico Figura 45.

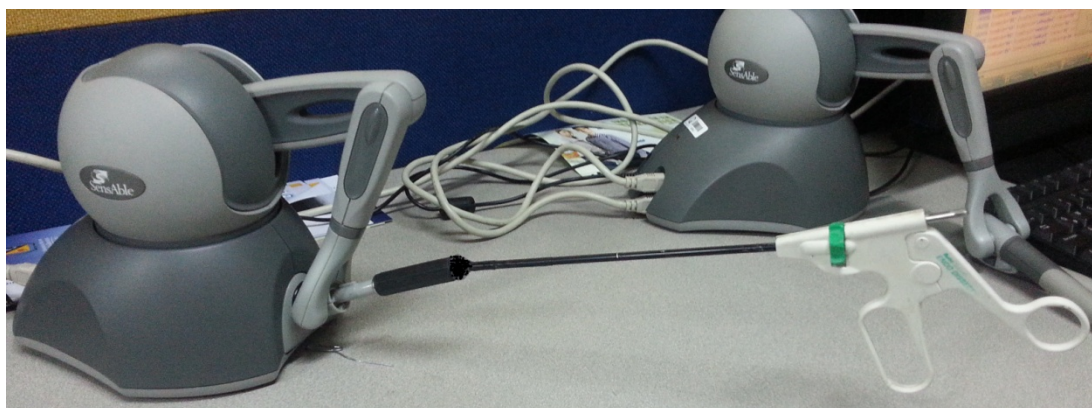


Figura 45. Pinza Endo Dissect adaptada a Phantom Omni

Se procede de igual manera con la pinza Electrobisturi Ligasure, sus componentes se visualizan en la Figura 46.

En la Figura 47 y Figura 48 se observan los pulsadores instalados en la pinza, y el cableado que conecta los pulsadores con el dispositivo estéreo hembra, ubicado en la punta del instrumental.

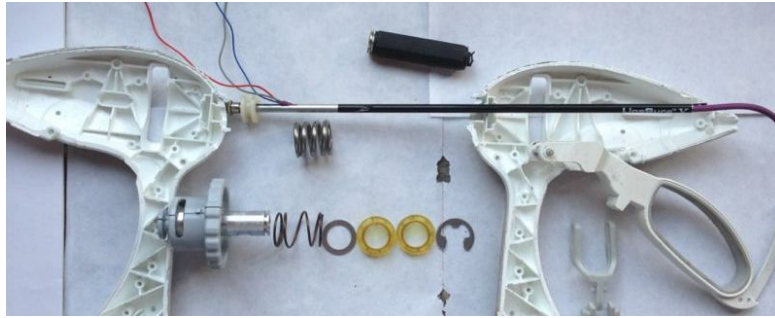


Figura 46. Componentes Pinza Electrobisturi Ligasure

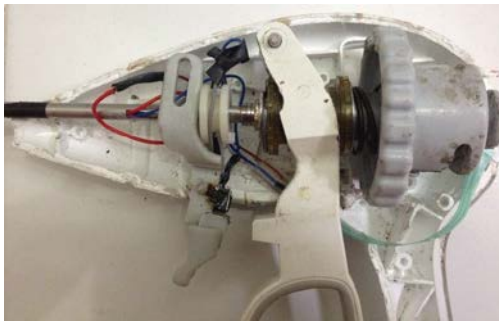


Figura 47. Ubicación del Pulsador Interno en la pinza y cableado



Figura 48. Ubicación del Pulsador Externo en la pinza

Finalmente, realizada la instalación, se observa el instrumental adaptado al dispositivo Phantom Omni en la Figura 49.



Figura 49. Pinza Electrobisturi Ligasure adaptada a Phantom Omni

Teniendo las pinzas adaptadas al dispositivo háptico, se procedió a la construcción de la caja contenedora de los componentes.

Primero, se adquirió un maniquí de cuerpo completo con silueta masculina, de las dimensiones entre los 46 x 70 cm. Ya que el diseño, está dimensionado al abdomen, se cortó el modelo y se hicieron los orificios donde se insertarán las pinzas adaptadas, como se muestra en la Figura 50. Además, se utilizó una espuma en los orificios, para facilitar la posición del instrumental en el dispositivo.



Figura 50. Tapa Caja Contenedora (Maniquí)

Teniendo esto, se construyó la caja según dimensiones de los planos descritos en el Anexo 1.

Con la caja construida, se añadió la tapa del maniquí, como resultado final se obtuvo el sistema ilustrado en la Figura 51.



Figura 51. Caja contenedora Completa

## 4.2. EVALUACIÓN DEL SISTEMA

Se realizaron las pruebas para determinar la respuesta del sistema y su variabilidad (expresada estadísticamente como la desviación estándar) en las tareas de cada uno de los aplicativos. Los resultados demostraron que el rendimiento del usuario, mejora notablemente en cada ensayo.

Los datos completos de cada una de las pruebas, se encuentran en el Anexo 4.

Para poder realizar las pruebas estadísticas, fue necesario hacer un promedio entre todos los usuarios, en cada uno de los nueve intentos totales; y así tener los datos medios de cada prueba. Estas cifras se pueden observar en Tabla 1.

Con ese registro, se obtienen los resultados de las Figura 52, Figura 53 y Figura 54.

PRUEBA	GRUPO EXPERIMENTAL			GRUPO DE CONTROL		
	JUEGO 1 (segundos)	JUEGO 2	JUEGO 3 (segundos)	JUEGO 1 (segundos)	JUEGO 2	JUEGO 3 (segundos)
1	291,2	5,5	150,8	53	9,5	111
2	143,7	7,8	74,8	51	13	37,5
3	110,4	10	57	44,5	17	33
4	107,2	11,1	69,3	40,5	17	35,5
5	67	13,2	46,5	39,5	17	29
6	53,7	14,2	34,3	38	17	27,5
7	59,3	15,1	31,6	33	17	24
8	39,1	16,2	25,6	36	17	20,5
9	30,5	17	20,2	30	17	19,5

Tabla 1. Promedio de Datos de las Pruebas

En la Figura 52, Figura 53, Figura 54; se puede observar que el desempeño del grupo experimental es muy variable, con respecto al del grupo de control.

En las pruebas del grupo experimental, en donde la variable medida es el tiempo (Figura 52 y Figura 54); este fue disminuyendo progresivamente, hasta llegar a ejecutar las aplicaciones, en una duración comparable con del grupo de control.

En la prueba donde se midió el número de modelos recolectados o destruidos (Figura 53); al mayor número de intentos, el usuario va aumentando su desempeño, hasta que en las pruebas finales, complete el 100% de la actividad.

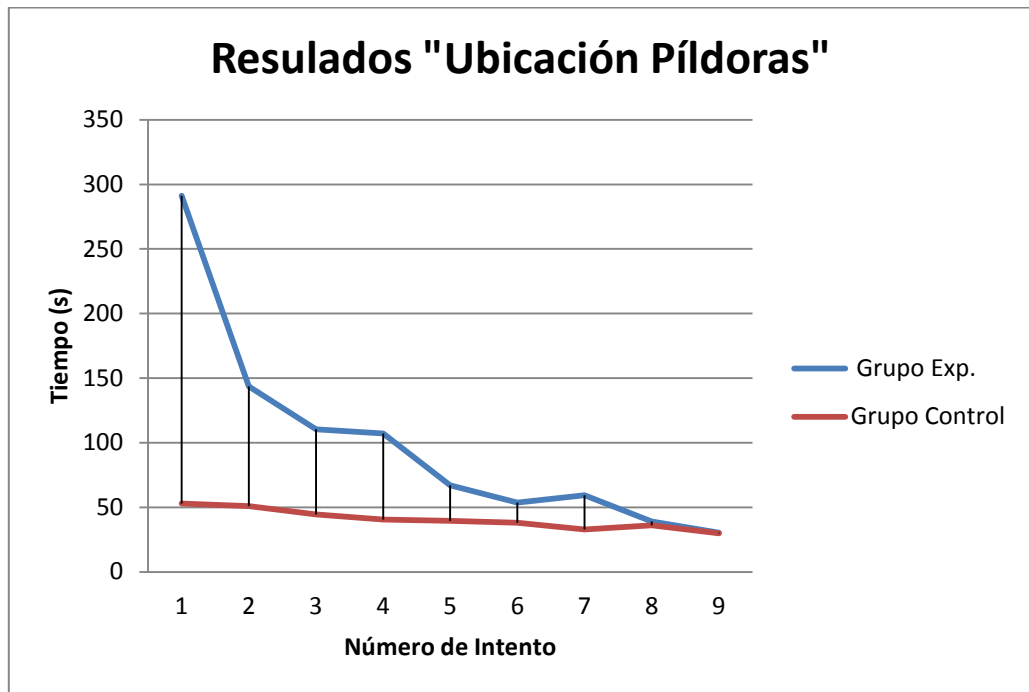


Figura 52. Evaluación Juego "Ubicación Píldoras"

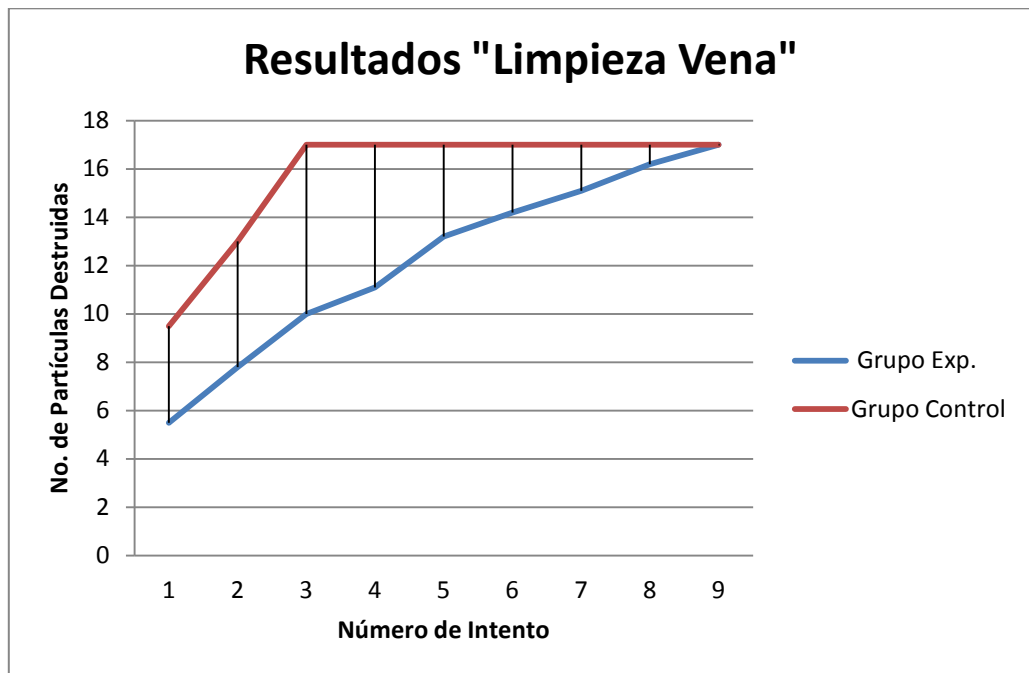


Figura 53. Evaluación Juego "Limpieza Vena"



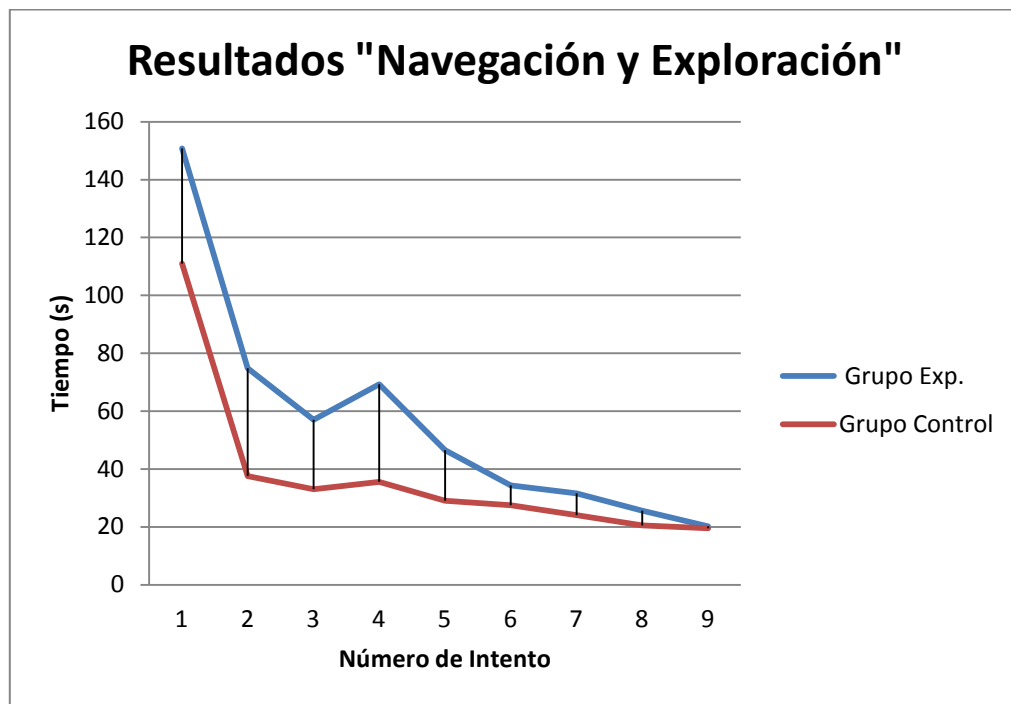


Figura 54. Evaluación Juego "Navegación y Exploración"

Se utilizó la herramienta de análisis de datos Herramientas para análisis – VBA, complemento de Microsoft Office Excel para realizar los análisis estadísticos ANOVA y la Prueba t de Student.

#### 4.2.1. Análisis de Varianza ANOVA

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) de los resultados de cada una de las aplicaciones, para determinar si alguno de los valores medios difieren significativamente del resto. Para realizar este estudio, se agruparon los resultados por el día de ejecución de las pruebas.

Para el juego "Ubicación Píldoras" se obtuvieron los resultados de la Tabla 2 y Tabla 3.

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desv. Est.</i>	<i>Varianza</i>
Día 1	3	545,3	181,7666667	96,22350718	9258,963333
Día 2	3	227,9	75,96666667	27,85432342	775,8633333
Día 3	3	128,9	42,96666667	14,78422583	218,5733333

Tabla 2. Resumen del Análisis ANOVA "Ubicación Píldoras"

En el resumen se observa que el análisis se desarrolló sobre los resultados de los nueve intentos totales, agrupados en tres intentos diarios. Se obtiene la suma total de los resultados promediados, al igual que el tiempo promedio de ejecución de la actividad.

Igualmente se calculan las medidas de dispersión: Desviación estándar, que mide la separabilidad o variabilidad de los datos y varianza, la cual indica la media de las diferencias, con la media elevada al cuadrado; del aplicativo.

<b><i>Origen de las variaciones</i></b>	<b><i>Suma de cuadrados</i></b>	<b><i>Grados de libertad</i></b>	<b><i>Promedio de los cuadrados</i></b>	<b><i>F</i></b>	<b><i>Probabilidad</i></b>	<b><i>Valor crítico para F</i></b>
Entre grupos	31548,08	2	15774,04	4,6153	0,06113773	5,1432
Dentro de los grupos	20506,8	6	3417,8			
Total	52054,88	8				

Tabla 3. Indicadores ANOVA "Ubicación Píldoras"

En el análisis específico de varianza ANOVA, se descompone la variabilidad total de los datos en dos fuentes de variación, la de cada uno de los días y la debida a la precisión dentro de cada día de prueba. La suma de cuadrados entre grupos mide las desviaciones entre los resultados individuales de cada día y la media de ese día. La suma de cuadrados dentro de los grupos, mide las desviaciones entre los resultados medios de los días y el resultado medio global.

Los grados de libertad se calculan, en el análisis entre grupos como el número de días en que se realizaron las pruebas menos 1. Y dentro de los grupos, como el



número total de pruebas, menos el número de días donde se realizaron las pruebas.

Teniendo esos valores (suma de cuadrados, y grados de libertad), se calculan los promedios de los cuadrados, dividiendo la suma entre los grados de libertad correspondientes; teniendo así una medida de las dispersiones anteriormente comentadas, para compararlas mediante una prueba de hipótesis F. Este indicador, se calcula por medio del cociente entre el promedio de los cuadrados entre grupos y el promedio dentro de los grupos. El valor crítico de F, se obtiene evaluando F con el nivel de significación escogido para el estudio, en este caso 0,05.

Finalmente, en el análisis se interpretan los datos de la siguiente forma: Si existiera algún error sistemático, el valor F será mayor al valor crítico de F; de lo contrario la presencia de errores aleatorios será la causa de la discrepancia entre los valores medios.

Se procede de igual manera con las aplicaciones restantes.

La Tabla 4 y Tabla 5 muestran los resultados de la aplicación “Limpieza Vena”.

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desv. Est.</i>	<i>Varianza</i>
Día 1	3	23,3	7,766666667	2,250185178	5,063333333
Día 2	3	38,5	12,83333333	1,582192572	2,503333333
Día 3	3	48,3	16,1	0,953939201	0,91

Tabla 4. Resumen del Análisis ANOVA “Limpieza Vena”

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	105,7866667	2	52,893	18,719	0,00264	25,1432
Dentro de los grupos	16,95333333	6	2,825			
Total	122,74	8				

Tabla 5. Indicadores ANOVA "Limpieza Vena"

En la Tabla 6 y Tabla 7 se observa el análisis del aplicativo "Navegación y Exploración".

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desv. Est.</i>	<i>Varianza</i>
Día 1	3	282,6	94,2	49,8184705	2481,88
Día 2	3	150,1	50,03333333	17,7655097	315,613333
Día 3	3	77,4	25,8	5,70263097	32,52

Tabla 6. Resumen del Análisis ANOVA "Navegación y Exploración"

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	7216,50889	2	3608,254	3,825	0,08492	4,14325285
Dentro de los grupos	5660,02667	6	943,337			
Total	12876,5356	8				

Tabla 7. Indicadores ANOVA "Navegación y Exploración"

Finalmente se puede concluir, teniendo en cuenta los valores de las tablas anteriores, que la variabilidad de los datos, en el desarrollo de las tres aplicaciones; disminuye a medida que se aumenta el número de pruebas en los usuarios; verificando así el entrenamiento de las personas en el uso del sistema.

Además, se observa que en los tres aplicativos, no existen errores sistemáticos y que hay alguna pequeña variación entre los valores medios, producto de errores aleatorios; ya q el indicador F es mayor al valor crítico del mismo.

<i>Variable</i>	<i>Ubicación Píldoras</i>	<i>Limpieza Vena</i>	<i>Navegación y Exploración</i>
F	4,6153	18,719	3,825
Valor Crítico de F	5,1432	25,1432	4,14325285

Tabla 8. Valores F de las aplicaciones

#### 4.2.2. Prueba t de Student

Se realizó una evaluación de los resultados de cada una de las aplicaciones, de los diez usuarios pertenecientes al grupo experimental, antes y después de realizar el entrenamiento con el sistema.

<b>USUARIO</b>	<b>TIEMPO INICIAL J1</b>	<b>TIEMPO FINAL J1</b>	<b>INICIAL J2</b>	<b>FINAL J2</b>	<b>TIEMPO INICAL J3</b>	<b>TIEMPO FINAL J3</b>
1	226	31	4	17	118	19
2	266	29	5	17	74	22
3	169	29	14	17	46	18
4	350	28	1	17	237	18
5	730	34	0	17	210	21
6	382	34	2	17	104	26
7	208	27	5	17	174	18
8	178	30	11	17	65	21
9	174	31	9	17	194	21
10	229	32	4	17	286	18

Tabla 9. Resultados Antes y Después Aplicaciones

Con los datos de la Tabla 9, se realizó el análisis estadístico de la prueba t para contrastar hipótesis sobre medias de los resultados. Para este experimento, la hipótesis a comprobar fue: Existe entrenamiento en los usuarios al utilizar el sistema recurrentemente, aumentando su desempeño al desarrollar las pruebas.

Para el primer juego “Ubicación Píldoras”, se obtuvieron los resultados de la Tabla 10.

<i>Indicadores</i>	<i>Antes Entren.</i>	<i>Después Entren.</i>
Media	291,2	30,5
Varianza	29045,28889	5,611111111
Observaciones	10	10
Coeficiente de correlación de Pearson	0,575505182	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de Libertad	9	
Estadístico t	4,87598728	
P(T<=t) una cola	0,000438115	
Valor Crítico de T (una cola)	1,833112933	
P(T<=t) dos colas	0,00087623	
Valor Crítico de T (dos colas)	2,262157163	

Tabla 10. Prueba t "Ubicación Píldoras"

Se observa que el tiempo promedio de ejecución del objetivo, disminuyó considerablemente de 291,2 a 30,5 segundos.

El coeficiente de Pearson, mide el grado de correlación entre los datos antes y después del entrenamiento. En este caso, su valor se encuentra entre 0 y 1, indicando una correlación positiva, es decir que las muestras dependientes.

Para comprobar que la hipótesis planteada es válida, en el estudio, el valor del estadístico t debe ser mayor a los valores críticos de una y dos colas. En este caso, esta afirmación es cierta; por lo que se concluye que hubo entrenamiento.

La Tabla 11 muestra los datos del análisis del aplicativo "Limpieza Vena". En este, la variable medida no fue el tiempo de ejecución, sino la cantidad de modelos virtuales recolectados y/o destruidos. Para evaluar el entrenamiento, el usuario debe aumentar el número de partículas por intento; lo cual se verifica observando la media de los valores antes y después de la ejecución de las pruebas, el cual aumentó de 5,5 a 17.

La relación entre los dos grupos de datos fue correlación positiva, indicando dependencia con un coeficiente de Pearson de 0,47697325.

Además se pudo comprobar que la hipótesis fue válida, comparando las magnitudes del estadístico t (8,075) con los críticos en una (1,833) y dos colas (2,262). En este caso, t, tiene signo negativo, ya que los valores antes al entrenamiento son menores a los posteriores.

<i>Indicadores</i>	<i>Antes Entren.</i>	<i>Después Entren.</i>
Media	5,5	17
Varianza	20,27777778	0
Observaciones	10	10
Coeficiente de correlación de Pearson	0,47697325	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de Libertad	9	
Estadístico t	-8,075839157	
P(T<=t) una cola	1,0263E-05	
Valor Crítico de T (una cola)	1,833112933	
P(T<=t) dos colas	2,0526E-05	
Valor Crítico de T (dos colas)	2,262157163	

Tabla 11. Prueba t "Limpieza Vena"

Para el juego "Navegación y Recolección", se verifica reducción en el tiempo promedio de alcance del objetivo de 150,8 segundos antes del entrenamiento a 20,2 segundos después del mismo. También que el coeficiente de correlación de Pearson es  $0 < 0,354 < 1$ , lo cual indica la dependencia de los valores evaluados.

Además se observa el cumplimiento de la hipótesis de entrenamiento verificando que el valor de t 5,0364 es mayor al crítico de una y dos colas.

La información anterior se encuentra en la Tabla 12.

<i>Indicadores</i>	<i>Antes Entren.</i>	<i>Después Entren.</i>
Media	150,8	20,2
Varianza	6569,733333	6,622222
Observaciones	10	10
Coeficiente de correlación de Pearson	0,354031644	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de Libertad	9	
Estadístico t	5,036488994	
P(T<=t) una cola	0,000351567	
Valor Crítico de T (una cola)	1,833112933	
P(T<=t) dos colas	0,000703134	
Valor Crítico de T (dos colas)	2,262157163	

Tabla 12. Prueba t "Navegación y Exploración"

En la Figura 55 se observan algunos usuarios evaluando el sistema, las imágenes fueron tomadas en el Centro de Realidad Virtual de la UMNG.



Figura 55. Imágenes de Evaluación del Sistema

#### 4.2.3. Encuesta Post-Pruebas

Habiendo realizado la evaluación del sistema, se le presentó al usuario una encuesta, indagando sobre características del sistema.

El grupo encuestado estaba compuesto por los diez usuarios del grupo experimental y las preguntas realizadas fueron las siguientes:

1. Es usted ¿zurdo o diestro?
2. A su consideración, ¿Cuál de las dos pinzas es más fácil operar? ¿Endo Dissect o Electrobisturi Ligasure?
3. En las tres aplicaciones con las que interactuó, ¿Cuál le pareció más fácil de completar el objetivo?
4. ¿Cuál de los juegos le pareció más complicado de desarrollar?
5. Califique de 1 a 5 la comodidad al usar el sistema. Siendo 1 muy incómodo y 5 bastante cómodo.
6. Ordene las siguientes características de menor a mayor dificultad al momento de interactuar con el software: Ubicación en el Entorno, Profundidad de los modelos, Accionamiento de los botones.

En la Figura 56 se observan los resultados obtenidos.

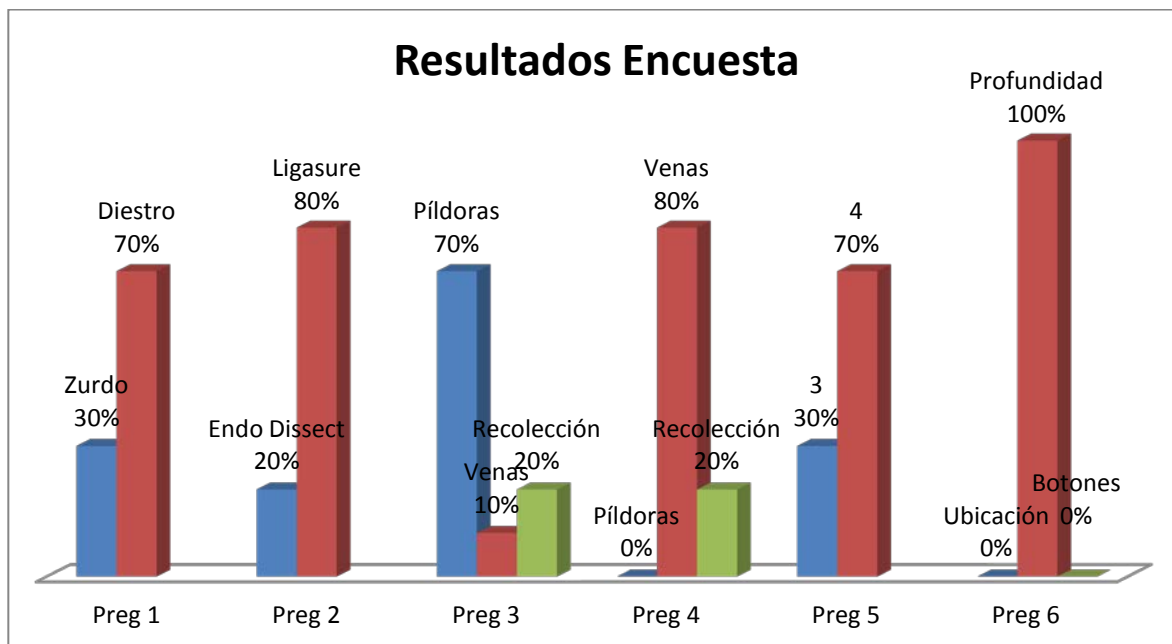


Figura 56. Gráfico Resultados Encuesta

Teniendo los resultados, se puede concluir que la mayoría de los usuarios encuestados eran diestros; lo cual no influyó en la manipulación del instrumental; ya que la pinza de mayor dificultad al manejar, fue Electrobisturí Ligasure; la cual está ubicada en la mano derecha.

Además, se pudo observar que las aplicaciones menos y más complicadas de completar el objetivo, fueron respectivamente “Ubicación Píldoras” y “Limpieza Vena”.

También se pudo determinar que el usuario se sentía cómodo al usar el sistema, mostrando que el 30% de la población encuestada lo valoró cómodo y el 70% restante como muy cómodo.

Como la mayoría de aplicaciones de realidad virtual, con entorno en dos dimensiones; al usuario se le dificultó lograr un cálculo aproximado de la profundidad de los objetos en la escena.



## 5. CONCLUSIONES

- El instrumental laparoscópico seleccionado para adaptarse a los dispositivos hápticos Phantom Omni; mostró un adecuado desempeño frente a los requerimientos establecidos al iniciar el proyecto. Las modificaciones mecánicas y electrónicas realizadas, integrando las pinzas a los dispositivos hápticos; tuvieron un buen funcionamiento durante el uso del sistema, evidenciándose en la respuesta del sistema al accionar los botones integrados al sistema.
- La creación de una caja contenedora, permitió organizar los componentes involucrados en el sistema y determinar el espacio de trabajo adecuado del dispositivo. Además, la silueta abdominal humana incluida en la tapa del sistema, agrega inmersión y ubica al usuario en el contexto laparoscópico.
- El desarrollo de las aplicaciones en la multiplataforma H3DAPI resultó adecuado, debido a que fue posible integrar dos dispositivos hápticos Phantom Omni en el mismo escenario, donde cada uno tiene su cursor para interactuar con los objetos virtuales del entorno. Además, permitió la implementación de funciones y acciones determinadas a los botones instalados en las pinzas laparoscópicas.
- Las aplicaciones desarrolladas, estuvieron envueltas en el escenario de la salud, desarrollando modelos virtuales de objetos como órganos del cuerpo humano, venas, glóbulos rojos, glóbulos blancos, cápsulas, etc. Con estos aplicativos, se logró el entrenamiento en el uso de instrumental quirúrgico real, de individuos que no tenían conocimiento previo en el manejo de los mismos.

- Se logró una correcta integración del sistema físico, con el software de aplicación desarrollado, ya que los movimientos producidos sobre las pinzas, se ven reflejados eficientemente en el entorno virtual, mostrando los cambios de posición, profundidad y características atribuidas a los pulsadores, en tiempo real. También, se permitía la manipulación de objetos virtuales, ejerciendo fuerza sobre los mismos, y recibiendo realimentación entregada por los dispositivos Phantom Omni.
- Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, reflejan que: aunque inicialmente el uso del sistema es de alta complejidad para usuarios sin experiencia en el manejo del mismo, a medida que se llevan a cabo las pruebas, aumentan las habilidades del individuo en el desarrollo de las aplicaciones; esto se evidencia en el último experimento de cada juego, donde los usuarios del grupo experimental logran igualar los resultados del grupo de control.
- El dispositivo permite una gran inmersión del usuario en el sistema, integrando el montaje mecánico, con los elementos virtuales (cursores, modelos 2d, sonidos, música); mejorando la experiencia de la persona a nivel de interactividad.
- El instrumento desarrollado, cuenta con todas las características para ser utilizado como dispositivo en simulaciones académicas, médicas o con fines de rehabilitación; realizando tareas con el movimiento y accionamiento del instrumental laparoscópico.

## 6. TRABAJOS FUTUROS

- Es posible integrar otros modelos de pinzas laparoscópicas modificadas, para ampliar las opciones de entrenamiento en cirugía.
- Desarrollar nuevos programas en la plataforma H3D API que permiten realizar procedimientos quirúrgicos completos, utilizando la plataforma de hardware desarrollada.
- En esta plataforma de hardware, se puede integrar a otros sistemas de simulación en medicina como SOFA FRAMEWORK y CHAI3D, que tienen compatibilidad con los dispositivos Phantom Omni e incluir las clases, para manejar modelos deformables y así aumentar el realismo de la simulación.
- Integrar un tercer dispositivo háptico, para manipular la vista del ambiente virtual, tal como se haría en un procedimiento real laparoscópico.
- Realizar un registro de software de las aplicaciones desarrolladas.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CMIYO, Cirugía Mínima Invasiva y Obesidad  
[http://cmiyo.com/index.php?id\\_categoria=11&id=9](http://cmiyo.com/index.php?id_categoria=11&id=9)
- [2] Simbionix, ARTHRO Mentor, <http://simbionix.com/simulators/arthro-mentor/>.
- [3] Laerdal, Virtual I.V. Simulator, <http://www.laerdal.com/us/doc/245/Virtual-I-V-Simulator>.
- [4] H3DAP: Open source haptics, <http://www.h3dapi.org/>.
- [5] Ryan McColl, Haptic Rendering & Perception Studies For Laparoscopic Surgery Simulation, Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS '06. 28th Annual International Conference of the IEEE, 2006.
- [6] Yunjin Gu, Kinematic and Jacobian Analysis of a Parallel-structured Haptic Interface for Laparoscopy Simulation, International Conference on Control, Automation and Systems, 2011.
- [7] Tianchi Zhang, Research on the Key Technology of Virtual Hysteroscopy Laparoscopy Surgery Simulator System, International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP), 2011.
- [8] Laerdal, Virtual I.V. Simulator, <http://www.laerdal.com/us/doc/245/Virtual-I-V-Simulator>.
- [9] Simbionix, ARTHRO Mentor, <http://simbionix.com/simulators/arthro-mentor/>.
- [10] N.G. Tsagarakis, A 5 dof haptic interface for pre-operative planning of surgical access in hip arthroplasty, Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on

Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005. First Joint, 2005.

[11] Anderson Maciel, Towards a Virtual Basic Laparoscopic Skill Trainer (VBLaST), [http://www.inf.ufrgs.br/~amacieli/publications/docs/mmvr2008\\_3.pdf](http://www.inf.ufrgs.br/~amacieli/publications/docs/mmvr2008_3.pdf).

[12] Kosta Milojevic, Universitatea "Politehnica" din Timișoara, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, Issue 2/2011.

[13] A. R. Norkhairani, Simulation for Laparoscopy Surgery with Haptic Element for Medical Students in HUKM: A Preliminary Analysis, Visual Informatics: Sustaining Research and Innovations Lecture Notes in Computer Science Volume 7066, pp 125-138, 2011.

[14] Byron Pérez Gutiérrez, Mechatronic Prototype for Rigid Endoscopy Simulation, Virtual and Mixed Reality - Systems and Applications, Lecture Notes in Computer Science Volume 6774, 2011, pp 30-36, 2011.

[15] Universidad Politécnica de Catalunya UPC, Facultad de Informática de Barcelona, Realidad Virtual, <http://www.fib.upc.edu/retro-informatica/avui/realitatvirtual.html>.

[16] Haptic Rendering: Foundations, Algorithms and Applications, Ming C. Lin, Miguel Otaduy, AK Peters, 2008.

[17] María Luisa Pinto Salamanca, Análisis e Implementación de una Interfaz Háptica en Entornos virtuales, Tesis presentada para magister en ingeniería automatización industrial, Universidad Nacional de Colombia, 2009.

[18] Sensable, Specifications for the PHANTOM Desktop and PHANTOM Omni haptic devices,

<http://www.sensable.com/documents/STIJan2009DesktopOmniComparisonprint.pdf>

[19]Geomagic, Sensable Phantom, Phantom Omni Overview, <http://geomagic.com/en/products/Phantom-Omni/overview>.

[20] Javier García Murillo, Diseño de Prototipo de Simulador para entrenamiento en cirugía laparoscópica, Revisa Ingeniería Biomédica, Volumen 5, Número 9, Enero-Junio 2011, págs. 13-19, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Universidad CES, Medellín, 2011.

[21]Procedimiento Laparoscópico, <http://www.Endometriosis.com.es/wp-content/uploads/2008/10/laparoscopia001.jpg>.

[22]MedlinePlus Enciclopedia Médica, Laparoscopia, <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/003918.htm>.

[23] Convidien, Ligasure, <http://www.ligasure.com/ligasure/pages.aspx>.

[24]Medcompare, Products, Dissectors, <http://www.medcompare.com/sunset/medcompare.html>.

[25]SenseGraphics, Software, Products, H3DAPI, [http://www.sensegraphics.com/index.php?page=shop.product\\_details&category\\_id=6&flypage=shop.flypage\\_sensegraphics&product\\_id=17&option=com\\_virtuemart&Itemid=83](http://www.sensegraphics.com/index.php?page=shop.product_details&category_id=6&flypage=shop.flypage_sensegraphics&product_id=17&option=com_virtuemart&Itemid=83).

[26] X3D: The Extensible 3D File Format, <http://www.web3d.org>.

[27] XML: Extensible Markup Language, <http://www.w3.org/XML>.

[28] OpenGL: Open Graphics Library, <http://www.opengl.org>.

[29]H3DAPI, SenseGraphics, Datasheet,  
[http://www.sensegraphics.com/datasheet/H3DAPI\\_datasheet.pdf](http://www.sensegraphics.com/datasheet/H3DAPI_datasheet.pdf).

[30] Python Programming Language, <http://www.python.org/>.

[31]H3DAPI, documentation, H3DAPI Manual  
[http://www.h3dapi.org/uploads/api/H3DAPI\\_2.2/doc/H3D%20API%20Manual.pdf](http://www.h3dapi.org/uploads/api/H3DAPI_2.2/doc/H3D%20API%20Manual.pdf).

[32]H3DAPI, Mediawiki, Surfaces  
<http://www.h3dapi.org/modules/mediawiki/index.php/Surfaces>.

[33]H3DAPI, Mediawiki, Force Effects,  
[http://www.h3dapi.org/modules/mediawiki/index.php/Force\\_effects](http://www.h3dapi.org/modules/mediawiki/index.php/Force_effects).

[34]H3DAPI, MediaWiki, Toogle Group,  
[http://www.h3dapi.org/modules/mediawiki/index.php/Toggle\\_group](http://www.h3dapi.org/modules/mediawiki/index.php/Toggle_group).

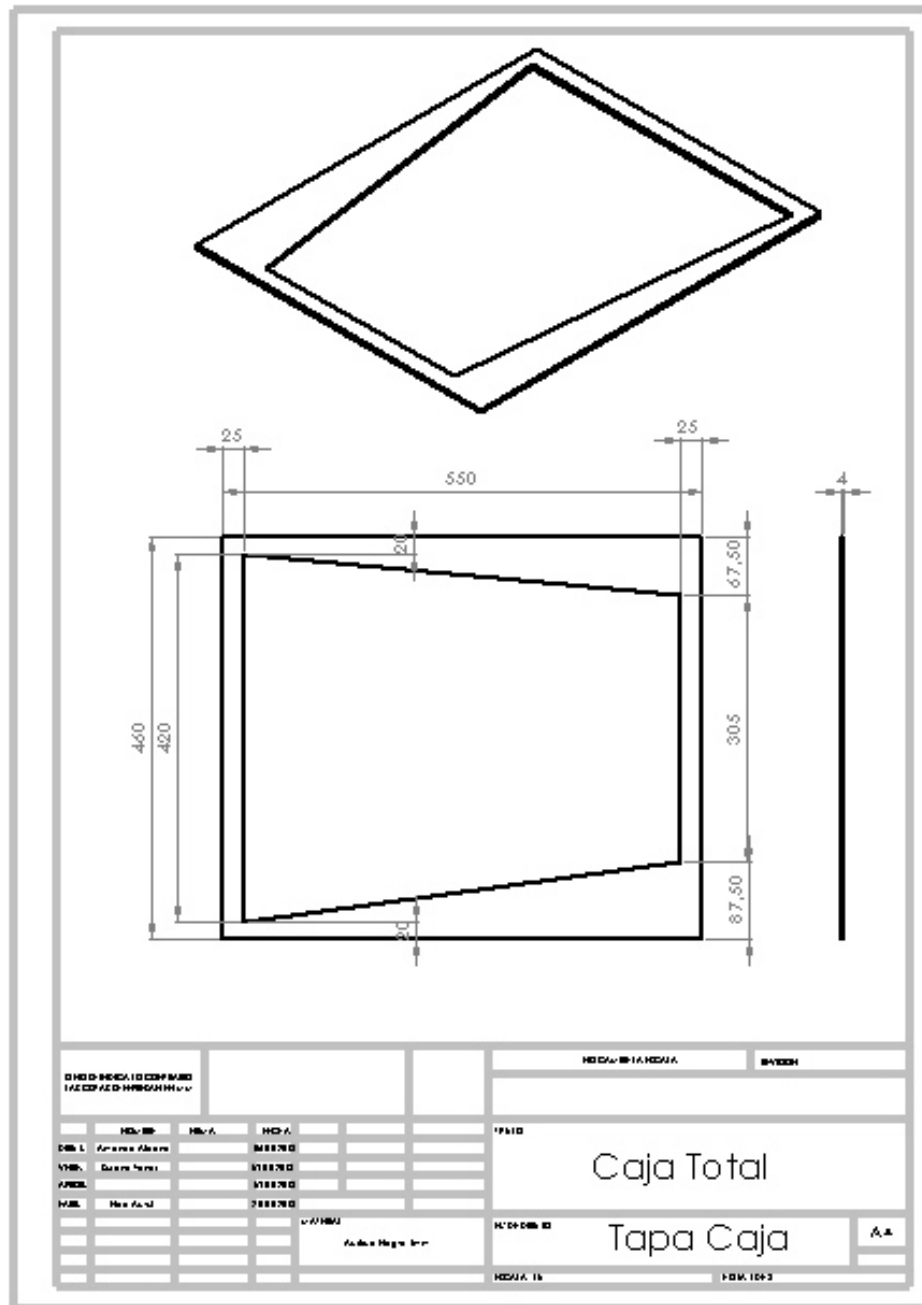
[35]H3DAPI, MediaWiki, H3DAPI with Python,  
[http://www.h3dapi.org/modules/mediawiki/index.php/H3DAPI\\_with\\_Python](http://www.h3dapi.org/modules/mediawiki/index.php/H3DAPI_with_Python).

[36]H3DAPI, Módulos, API doc, Device Info,  
[http://www.h3dapi.org/modules/apidoc/html/classH3D\\_1\\_1DeviceInfo.html](http://www.h3dapi.org/modules/apidoc/html/classH3D_1_1DeviceInfo.html)

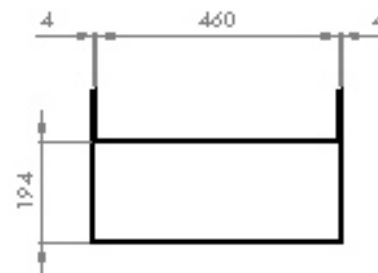
[37] José San Martín López, Aportaciones al diseño mecánico de los entrenadores basados en realidad virtual, Tesis Doctoral, Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores, Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial, Universidad Rey Juan Carlos de Madrid, 2007.

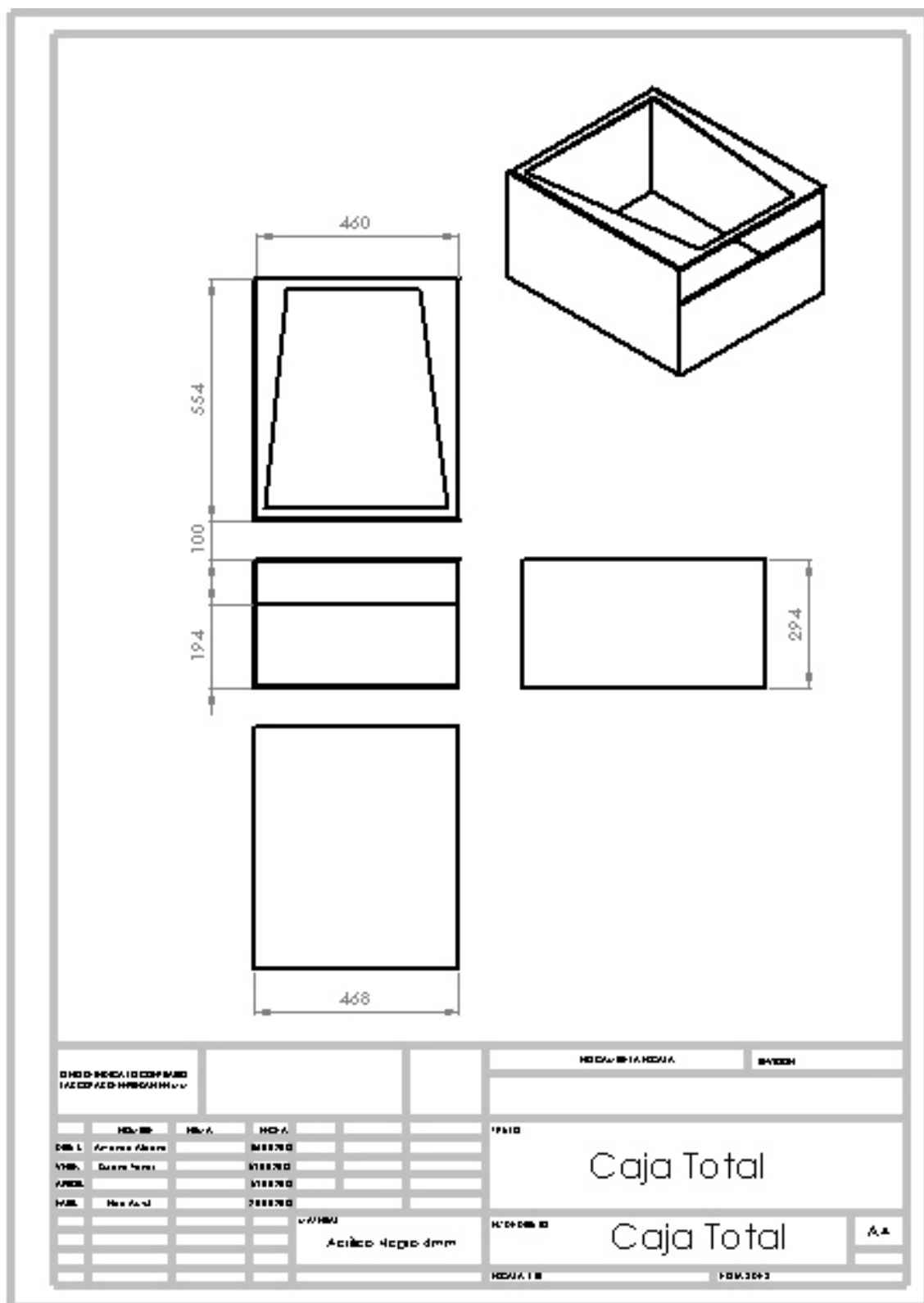
# ANEXOS

## Anexo 1. Planos Caja





105



## Anexo 2. Diagramas de Clases y Dependencia Aplicaciones

### “Ubicación Píldoras”

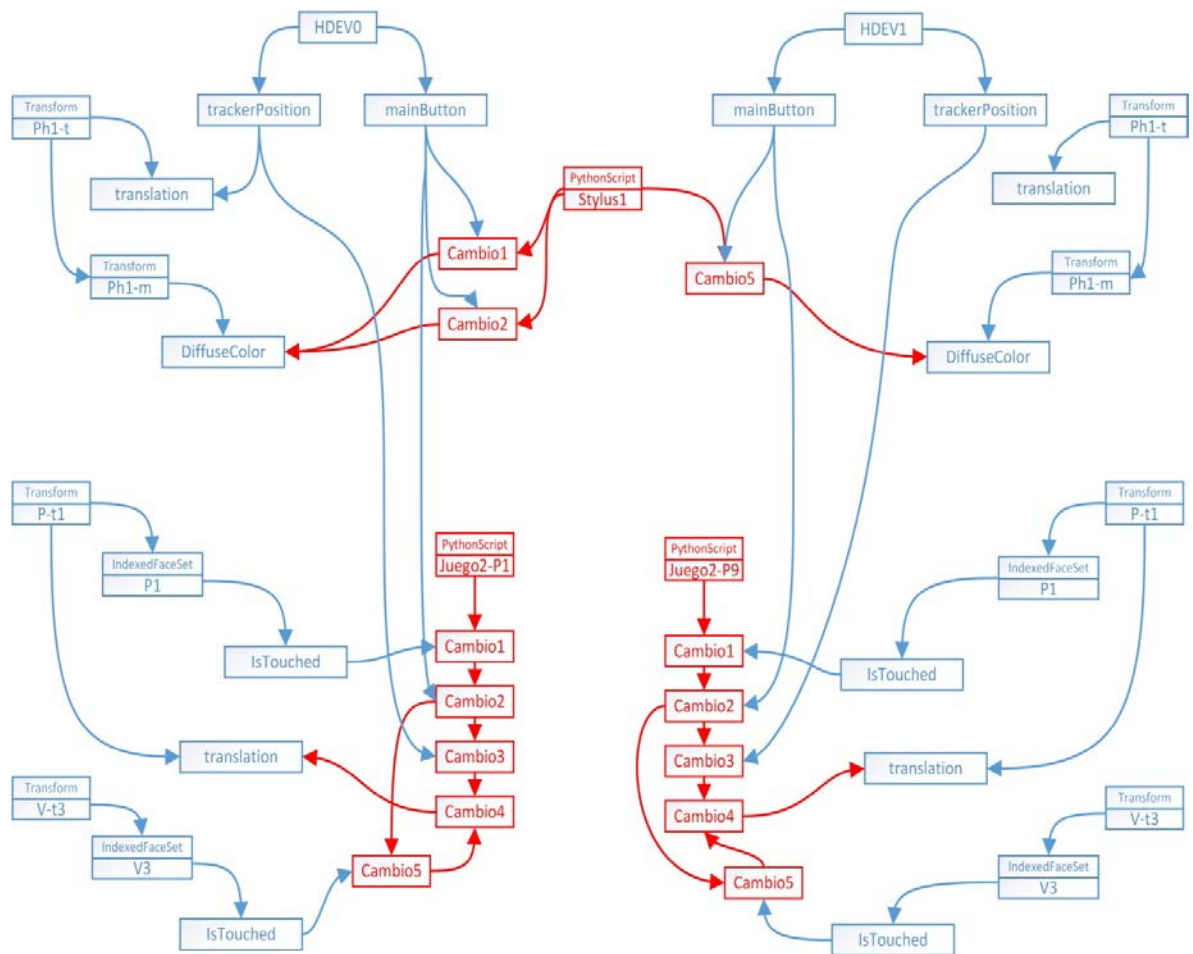


Diagrama clases y dependencias “Ubicación Píldoras”

## “Limpieza Vena”

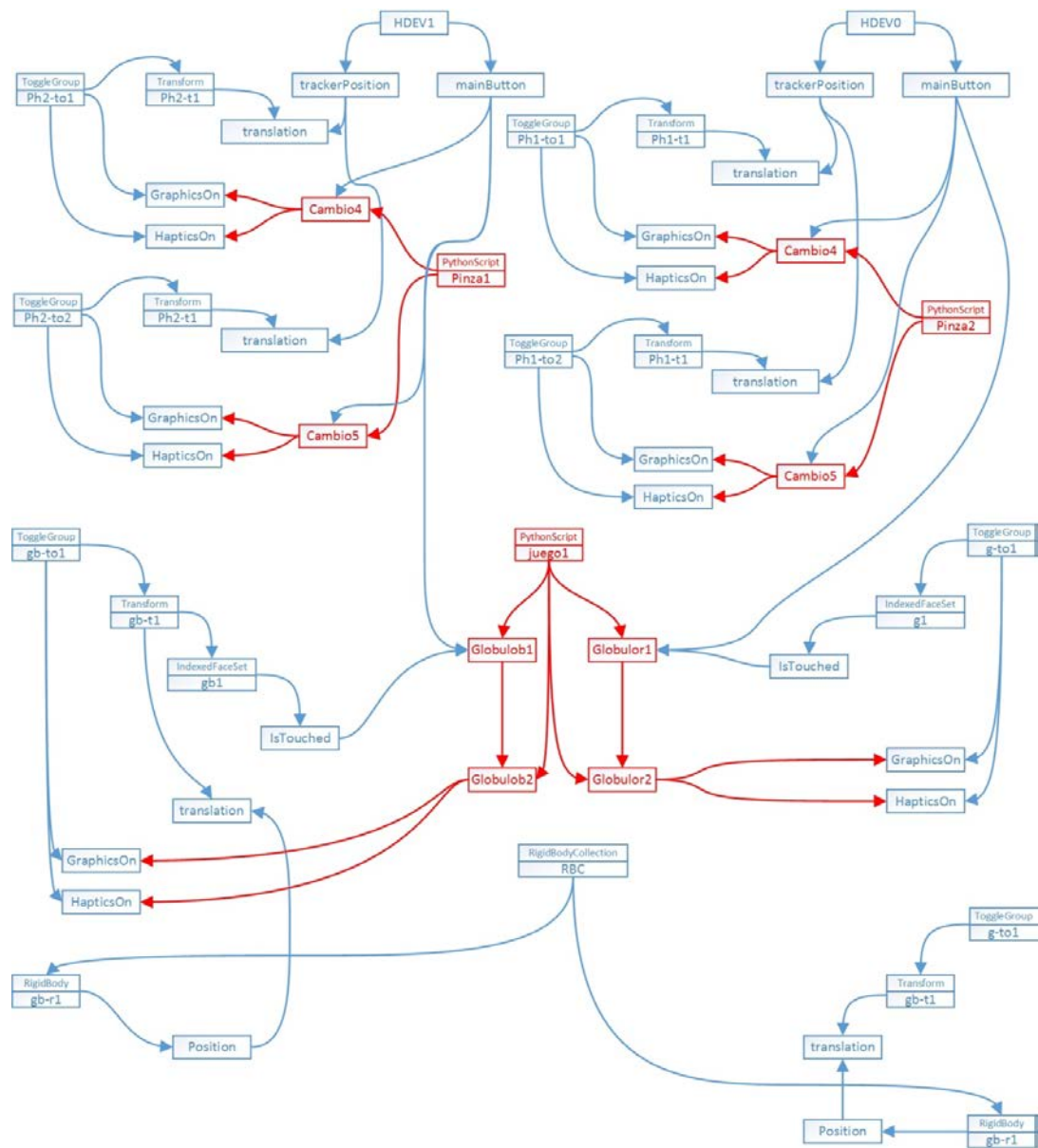


Diagrama clases y dependencias “Limpieza Vena”

## “Navegación y Exploración”

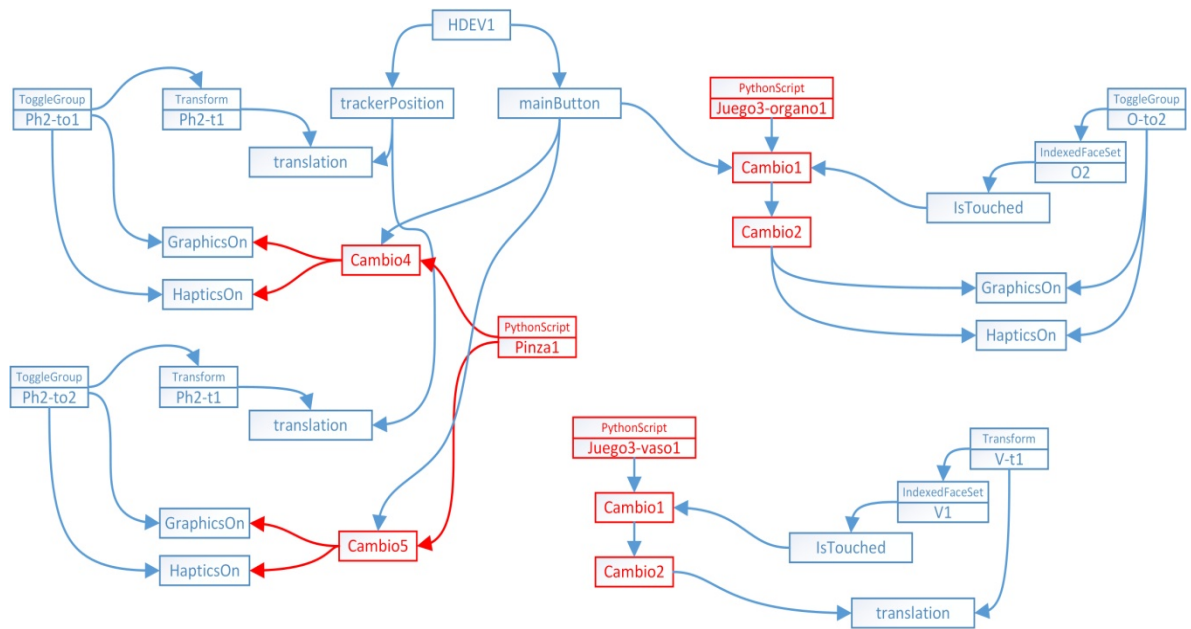


Diagrama clases y dependencias “Navegación y Exploración”

# MANUAL DE USO

## CONTENIDO

	Pág.
PRE REQUISITOS .....	112
PINZAS LAPAROSCOPICAS.....	112
CALIBRACIÓN DISPOSITIVOS HÁPTICOS .....	112
ABRIR UN ARCHIVO X3D .....	114
APLICACIONES DESARROLLADAS.....	116
Ubicación Píldoras.....	116
Limpieza Vena.....	117
Navegación y Recolección .....	118

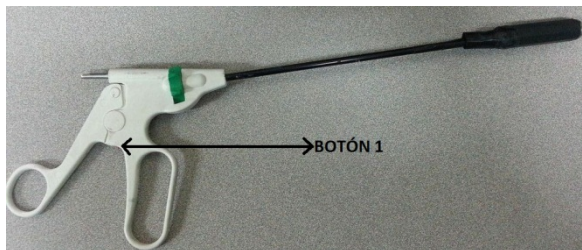
## PRE REQUISITOS

1. Tener instalados los controladores y software de configuración (Phantom Configuration) de los dispositivos hápticos Phantom Omni de Sensable Technologies en el ordenador donde se van a ejecutar aplicaciones.
2. Poseer el software de funcionamiento y visualización (H3D Viewer) de la plataforma H3DAPI instalado en el ordenador. Si no se cuenta con este, se puede descargar de manera gratuita de la página de internet <http://www.h3dapi.org/modules/PDdownloads/>.

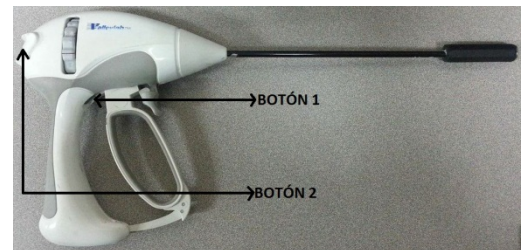
## PINZAS LAPAROSCOPICAS

Es necesario identificar los componentes del instrumental que interactúan con la interfaz virtual:

Pinza Endo Dissect:



Pinza Electrobisturí Ligasure:

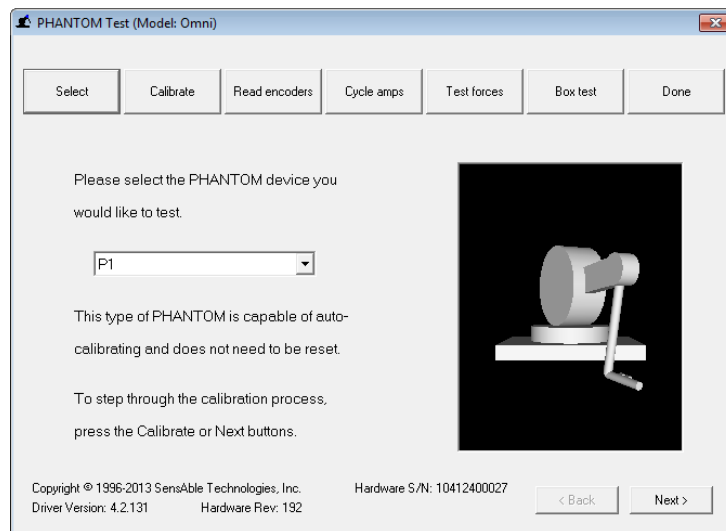


## CALIBRACIÓN DISPOSITIVOS HÁPTICOS

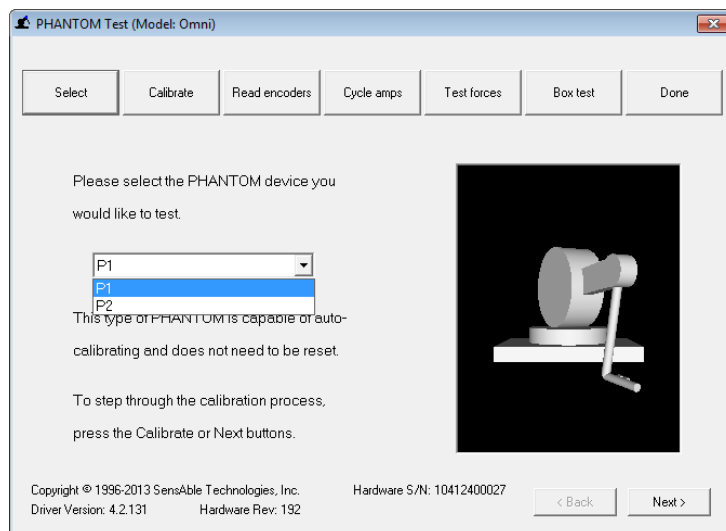
Antes de inicializar cualquiera de las aplicaciones, es necesario calibrar la posición inicial de los dispositivos hápticos Phantom Omni.

1. Teniendo los dispositivos conectados al ordenador, se abre la aplicación Phantom Test Modelo Omni.

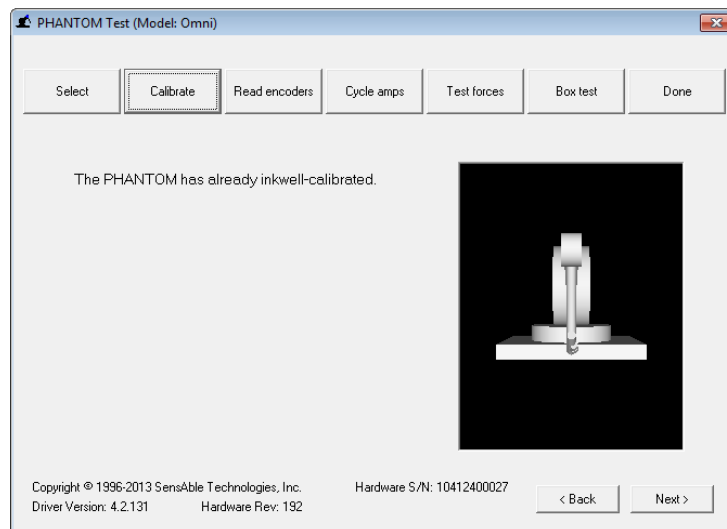




2. Se selecciona el dispositivo a calibrar, y se posiciona el dispositivo en el *inkwell* (posición inicial de calibración).



3. Teniendo ubicado el háptico, se da clic en el botón Calibrate.

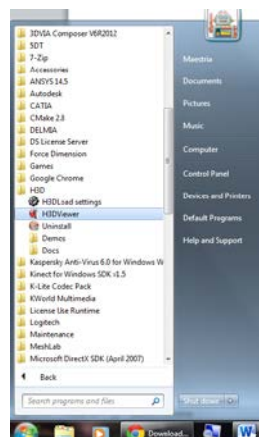


4. Se procede de igual manera con el segundo dispositivo.

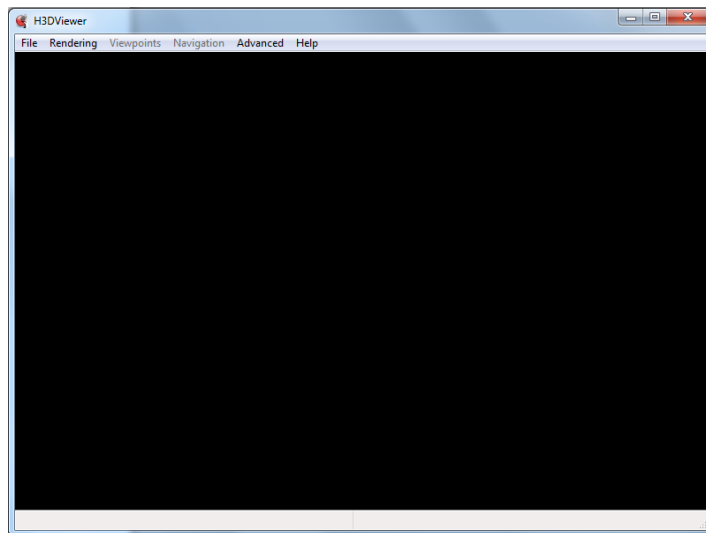
Teniendo la maqueta completamente ubicada, con el instrumental conectado (Pinza Endo Dissect: Phantom Izquierda, Pinza Ligasure: Phantom Derecha), se continúa abriendo las aplicaciones construidas.

## ABRIR UN ARCHIVO X3D

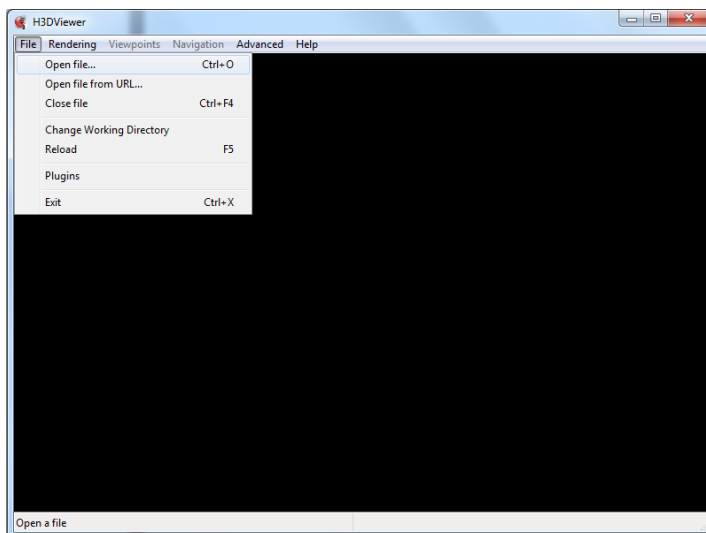
1. Abrir el visualizador de archivos X3D: H3DViewer.



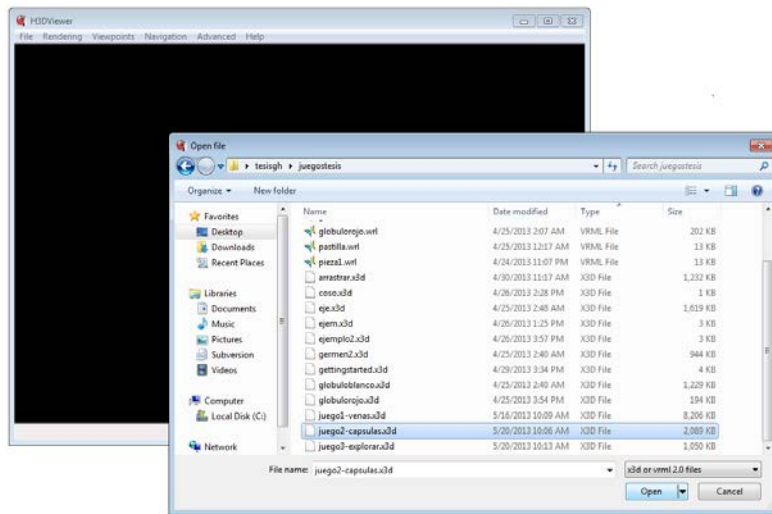
Una vez abierto, observa lo siguiente:



2. Para cargar los programas, se sigue la ruta: File / Open File o pulsando las teclas Ctrl+O.



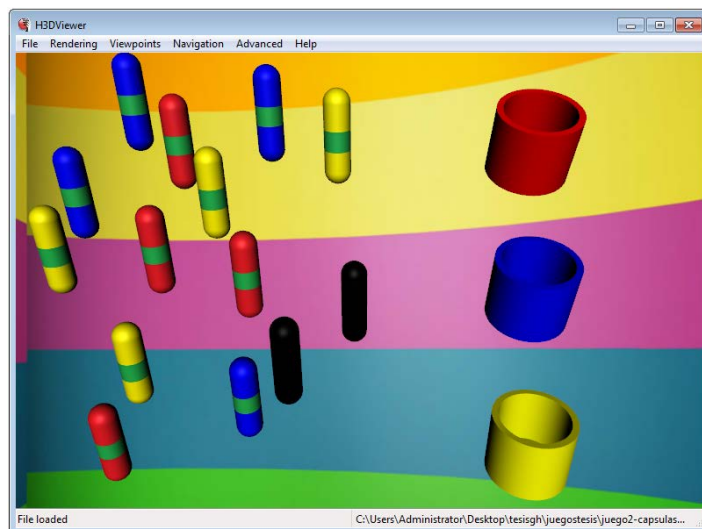
3. Se busca el archivo X3D a cargar, y finalmente se dará clic en el botón Open.



## APLICACIONES DESARROLLADAS

### Ubicación Píldoras

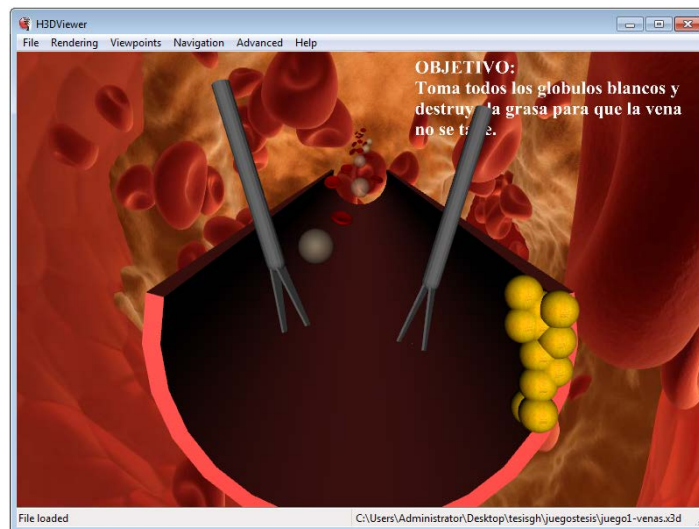
1. Teniendo la aplicación abierta, se procede a completar el objetivo: Recolectar las píldoras del mismo color y ubicarlas en el contenedor respectivo.



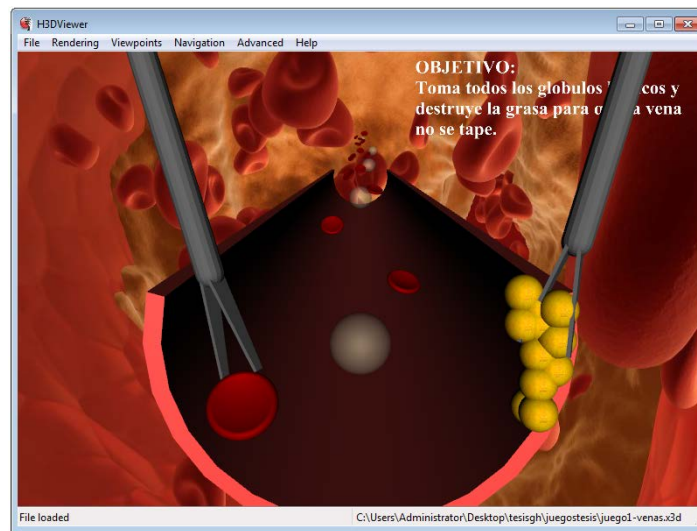
2. El instrumental permitirá el desplazamiento a través del entorno. Para facilitar la ubicación del usuario en la escena, se muestran píldoras de color negro, que visualizan la posición de las pinzas en el espacio virtual.
3. Para poder seleccionar y desplazar una píldora de su ubicación inicial al contenedor, es necesario colisionar con ella y accionar el botón correspondiente y mantenerlo accionado hasta llegar a la posición final deseada.
4. La pinza Endo Dissect, con su botón, recolecta las píldoras azules. Accionando el botón 1 de la pinza Electrobisturí Ligasure, se agrupan las cápsulas de color amarillo, y finalmente con el botón 2 de la misma pinza se reúnen las píldoras rojas.

### Limpieza Vena

1. Teniendo la aplicación cargada en el H3D Viewer, se comienza la actividad: Recolectar los glóbulos blancos con la Pinza Endo Dissect, (accionando el botón 1) y destruir las partículas de grasa con el instrumental Electrobisturí Ligasure (presionando el botón 1).



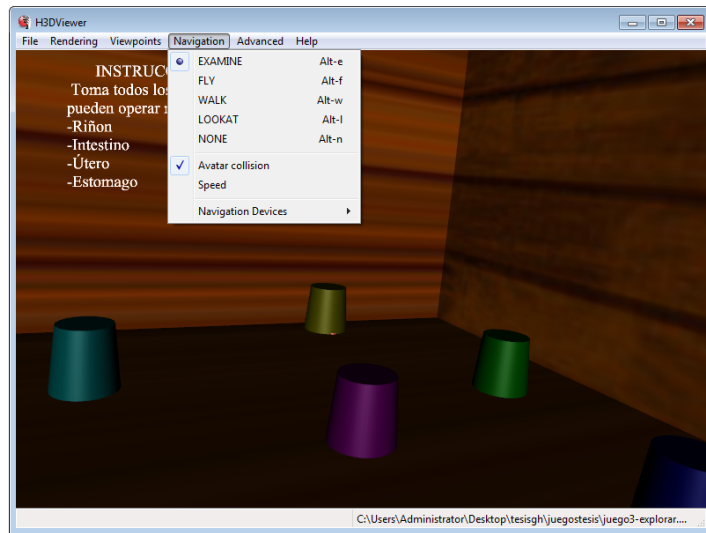
2. Para recolectar y destruir los modelos, es necesario colisionar las pinzas con los objetos, y presionar el botón correspondiente.
3. Las esferas blancas, representan los glóbulos blancos, las amarillas, partículas de grasa y los discos rojos glóbulos rojos.
4. Para habilitar el movimiento de los modelos que representan los glóbulos rojos y blancos a través de la vena, es necesario pulsar la tecla G en el teclado del ordenador.



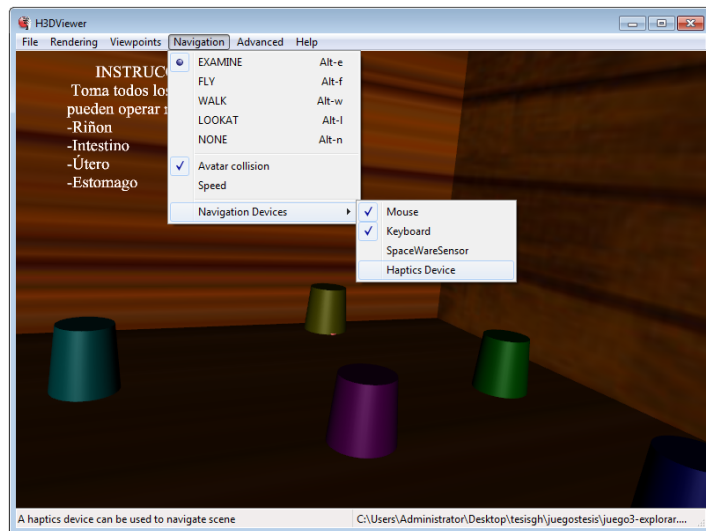
5. Se finaliza la actividad cuando los glóbulos blancos y rojos en movimiento terminan de caer por la vena.

### **Navegación y Recolección**

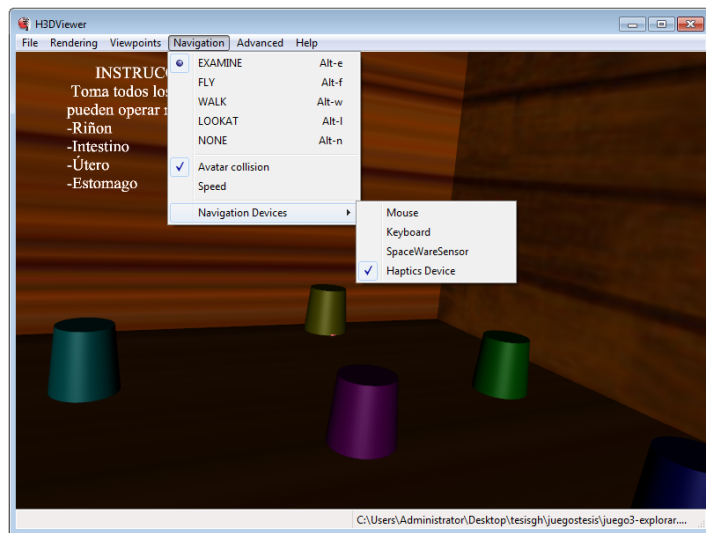
1. Habiendo ejecutado el archivo X3D del programa en el visualizador, es necesario habilitar unas opciones adicionales para poder desplazarse en el entorno virtual.
2. En la pestaña de Navigation, se selecciona la opción EXAMINE.



3. Siguiendo el proceso, en la misma pestaña Navigation, se debe habilitar el dispositivo háptico en la opción Navigation Devices.



4. Así se selecciona el dispositivo háptico como único dispositivo de navegación.



5. Teniendo configurado el visualizador, se procede a la consecución del objetivo: Recolectar los modelos de órganos ocultos bajo los vasos.
6. Para navegar en el entorno, se acciona el botón 1 de la pinza Electrobisturí Ligasure y se realiza el movimiento a través del espacio virtual.
7. Para levantar los vasos y recolectar los órganos, se colisiona con los mismos accionando el botón 1 del instrumental Endo Dissect.



Anexo 4. Tablas de Datos para la Evaluación del Sistema.

USUARIO	GRUPO EXPERIMENTAL					
	PRUEBA	TIEMPO J1 (segundos)	JUEGO 2		TOTAL J2	TIEMPO J3 (segundos)
			GLOBULOS	GRASA		
1	1	226	2	2	4	118
	2	154	3	5	8	75
	3	139	3	7	10	60
	4	156	3	3	6	73
	5	93	4	9	13	59
	6	89	5	9	14	35
	7	89	5	11	16	33
	8	46	6	10	16	26
	9	31	6	11	17	19
2	1	266	2	3	5	74
	2	163	5	6	11	61
	3	142	3	7	10	54
	4	80	5	11	16	68
	5	54	5	11	16	47
	6	48	6	11	17	33
	7	50	5	9	14	33
	8	36	5	11	16	25
	9	29	6	11	17	22
3	1	169	3	11	14	46
	2	160	5	9	14	38
	3	131	5	10	15	33
	4	53	6	11	17	73
	5	53	5	11	16	30
	6	50	6	11	17	23
	7	54	6	11	17	20
	8	37	6	10	16	20
	9	29	6	11	17	18
4	1	350	1	0	1	237
	2	116	0	3	3	113
	3	80	3	8	11	104
	4	47	2	6	8	58

	5	36	4	7	11	51
	6	36	3	8	11	43
	7	41	5	9	14	32
	8	36	6	10	16	29
	9	28	6	11	17	18
5	1	730	0	0	0	210
	2	129	0	2	2	76
	3	68	1	0	1	70
	4	119	2	4	6	87
	5	70	4	4	8	48
	6	49	3	7	10	36
	7	59	6	5	11	34
	8	42	6	9	15	26
	9	34	6	11	17	21
6	1	382	1	1	2	104
	2	312	1	0	1	70
	3	262	2	2	4	52
	4	278	3	4	7	60
	5	164	5	10	15	52
	6	101	4	8	12	47
	7	103	5	11	16	38
	8	46	6	11	17	33
	9	34	6	11	17	26
7	1	208	3	2	5	174
	2	105	5	10	15	54
	3	73	2	8	10	45
	4	51	3	11	14	60
	5	41	5	11	16	43
	6	37	6	11	17	31
	7	39	5	9	14	30
	8	33	6	11	17	24
	9	27	6	11	17	18
8	1	178	6	5	11	65
	2	72	3	9	12	54
	3	49	5	11	16	41
	4	63	6	11	17	51

	5	46	6	8	14	39
	6	37	5	11	16	27
	7	47	6	11	17	32
	8	35	6	10	16	25
	9	30	6	11	17	21
9	1	174	2	7	9	194
	2	115	1	3	4	86
	3	74	4	7	11	54
	4	80	5	8	13	63
	5	52	5	6	11	48
	6	46	6	9	15	33
	7	55	5	11	16	32
	8	42	6	11	17	25
	9	31	6	11	17	21
10	1	229	2	2	4	286
	2	111	3	5	8	121
	3	86	4	8	12	57
	4	145	2	5	7	100
	5	61	4	8	12	48
	6	44	5	8	13	35
	7	56	5	11	16	32
	8	38	5	11	16	23
	9	32	6	11	17	18

USUARIO	GRUPO DE CONTROL				
	TIEMPO J1 (segundos)	JUEGO 2		TOTAL J2	TIEMPO J3 (segundos)
		GLOBULOS	GRASA		
1	61	3	8	11	162
	59	4	11	15	49
	52	6	11	17	43
	46	6	11	17	36
	41	6	11	17	33
	38	6	11	17	31
	31	6	11	17	28
	39	6	11	17	23
	32	6	11	17	21
2	45	3	5	8	60
	43	6	5	11	26
	37	6	11	17	23
	35	6	11	17	35
	38	6	11	17	25
	38	6	11	17	24
	35	6	11	17	20
	33	6	11	17	18
	28	6	11	17	18